Airport Asphalt Pavement Technology Program

Manual de pavimento asfáltico

Edición 2025

Actualizado con enlaces de video

© NAPA

Tabla de contenidos

1. Introducción....1
1.1. Propósito y Organización del Manual 1
1.2. Pavimentación de Aeródromos 2
1.3. Mezclas de Asfalto Definidas y Clasificadas 4
1.4. Ejecución (Mano de Obra) 6
1.5. Programas de Certificación y Acreditación.... 7

2. Organización del Proyecto....8
2.1. Introducción 8
2.2. Documentos del Proyecto 8
2.3. Conferencia de Preconstrucción 10
2.4. Comunicación Continua 12
2.5. Registros Continuos 14
2.6. Seguridad....18

3. Materiales Asfálticos y Diseño de Mezclas 20
3.1. Introducción 20
3.2. Ligante Asfáltico: Sistemas de Clasificación y Propiedades 21
3.3. Características y Propiedades del Agregado.... 28
3.4. Volumetría de la Mezcla 40
3.5. Propiedades de la Mezcla Asfáltica 42
3.6. Aditivos.... 48
3.7. Procedimientos de Diseño de Mezclas 51
3.8. Mezclas de Laboratorio frente a Mezclas Producidas en Planta 57
3.9. Resumen....59

4. Producción de la Mezcla 60
4.1. Introducción 60
4.2. Almacenamiento y Manejo de Materiales 62
4.3. Alimentación en Frío del Agregado 68
4.4. Secado y Calentamiento del Agregado 73
4.5. Plantas Discontinuas....76
4.6. Plantas de Tambor y Continuas 88
4.7. Sistema de Control de Emisiones 94
4.8. Almacenamiento Temporal de la Mezcla 97
4.9. Pesaje y Carga.... 100
4.10. Seguridad 101
4.11. Solución de Problemas y Listas de Verificación.... 103

5. Preparación de la superficie 107
5.1. Introducción.... 107
5.2. Preparación de la Base para Pavimentos Asfálticos Nuevos 107
5.3. Preparación de la Superficie Asfáltica para Recubrimientos Asfálticos.... 109
5.4. Preparación de la Superficie de PCC para Recubrimientos Asfálticos 116

5.5. Riego de Liga..... 116
5.6. Resumen..... 131

6. Entrega de la Mezcla.....134
6.1. Introducción..... .134
6.2. Planificación.....134
6.3. Tipos de Camiones..... 136
6.4. Carga Correcta del Camión..... 139
6.5. Procedimientos de Transporte 140
6.6. Descarga de la Mezcla..... 142
6.7. Seguimiento de Cantidades..... 146
7. Colocación de la Mezcla 147
7.1 Introducción 147
7.2. Unidad Tractora....., ... 147
7.3. Unidad de Regla 158
7.4. Control de Pendiente 173
7.5. Espesor de la Capa 181
7.6. Establecimiento de la Velocidad de la Pavimentadora 182
7.7. Operaciones de Pavimentación Rela..... 184
7.8. Listas de Verificación de Mejores Prácticas 186
8. Compactación..... 189
8.1 Introducción 189
8.2 Definiciones 189
8.3 Rodillos 190
8.4 Factores que Afectan la Compactación..... 202
8.5 Variables de Compactación Bajo el Control del Operador..... 207
8.6 Determinación del Patrón de Rodadura..... 212
8.7 Listas de Verificación del Rodillo..... 217
9. Construcción de Juntas 218
9.1 Introducción 218
9.2 Juntas Transversales/ de Construcción..... 220
9.3 Juntas Longitudinales..... 225
9.4 Pavimentación y Rodadura en Escalón..... 239
9.5 Métodos No Convencionales de Juntas Longitudinales..... 241

10. Segregación 244
10.1 Introducción 244
10.2 Reconocimiento de la Segregación Física, Causas y Soluciones..... 247
10.3 Cuatro Etapas Donde Puede Originarse la Segregación..... 252
10.4 Segregación Térmica..... 255
10.5 Confirmación y Cuantificación de la Segregación..... 257

11. Aseguramiento de la Calidad..... 259
11.1 Introducción 259
11.2 Definiciones..... 259
11.3 Tipos Generales de Especificaciones..... 261
11.4 Plan de Control de Calidad..... 266
11.5 Métodos de Muestreo..... 270
11.6 Control de Calidad en la Planta..... 275
11.7 Control de Calidad en el Campo: Colocación y Compactación..... 278
11.8 Aceptación..... 283

12. Problemas del Tapete 287
12.1 Ondas Superficiales 289
12.2 Desgarro (Estrias) 292
12.3 Textura No Uniforme 294
12.4 Marcas de la Regla 296
12.5 Capacidad de Respuesta de la Regla..... 298
12.6 Sombras de Superficie 299
12.7 Mala Precompactación 300
12.8 Problemas de Juntas..... 301
12.9 Agrietamiento Fino 303
12.10 Empuje y Rodadura 309
12.11 Exudación (Sangrado) y Manchas Grasas 312
12.12 Marcas de Rodillo..... 315
12.13 Mala Compactación de la Mezcla..... 318
12.14 Otros Problemas del Pavimento..... 320

Apéndice..... 321
Videos de Asfalto para Aeropuertos AAPTP..... 321

Lista de Figuras

Figura 1. Tren de Rodillos Asegurando la Compactación en un Proyecto de Pista. 4
Figura 2. Líneas de Comunicación para el Control de Calidad..... 12
Figura 3. Ejemplo de Informe de Planta..... 15
Figura 4. Respuestas de Tensión y Deformación MSCR..... 23
Figura 5. Curva de Aceptación de Recuperación MSCR..... 24
Figura 6. Ejemplo de Tiempo de Compactación Disponible para un Tapete de 3 pulgadas.... 26
Figura 7. Ejemplo de Tiempo de Compactación Disponible para un Tapete de 1 pulgada 27
Figura 8. Gráfico de Gradación, Escala Exponencial (0.45)..... 30
Figura 9. Mezclas de Gradación Densa Trazadas en un Gráfico de Potencia 0.45..... 31
Figura 10. Mezcla de Gradación Abierta Trazada en un Gráfico de Potencia 0.45..... 33
Figura 11. Mezcla de Gradación Discontinua Trazada en un Gráfico de Potencia 0.45..... 34
Figura 12. Gravedades Específicas del Agregado..... 35
Figura 13. Diagrama de Fases de la Mezcla Asfáltica..... 40
Figura 14. Rodadura (Rutting) Debido a una Mezcla Superficial Inestable..... 43
Figura 15. Superficie de Pavimento Asfáltico Desprendida (Raveled)..... 44
Figura 16. Desprendimiento (Stripping) en la Interfaz de la Capa..... 44
Figura 17. Mezcla Resistente al Combustible en el Aeropuerto Regional Lynchburg..... 45
Figura 18. Permeabilidad Versus Vacíos de Aire en el Lugar por NMAS..... 46
Figura 19. Ranurado de una Pista de Aeródromo..... 48
Figura 20. Compactador Giratorio Superpave®..... 52
Figura 21. Componentes de la Planta Discontinua (Batch Plant) 61
Figura 22. Componentes de la Planta de Mezcla de Tambor..... 61
Figura 23. Transportador Telescópico Magnum Construyendo una Pila en Hileras (Windrows)..... 67
Figura 24. Carga de Tolvas de Alimentación en Frío de Agregados..... 69
Figura 25. Cinta Alimentadora de la Tolva de Alimentación en Frío..... 70
Figura 26. Sensor de Agregado de Alimentación de Tolva..... 70
Figura 27. Esquema de Alimentador de Paletas (Vane Feeder) 71
Figura 28. Campana o Cono de Impacto del Mezclador de Tambor 72
Figura 29. Secador Típico de una Planta Discontinua..... 74
Figura 30. Velo Uniforme de Agregado en el Secador..... 74
Figura 31. Diferentes Tipos de Paletas (Flights) del Secador..... 75
Figura 32. Secador de Flujo Paralelo..... 75
Figura 33. Secador de Contraflujo..... 76
Figura 34. Planta de Asfalto Discontinua..... 77
Figura 35. Torre de Dosificación 78
Figura 36. Cubiertas de Cribado y Tolvas Calientes..... 79
Figura 37. Dosificación Acumulativa de Tolvas Calientes..... 81
Figura 38. Sistema de Suministro de Ligante de Planta Discontinua..... 82
Figura 39. Mezcladora de Paletas (Pugmill) de Planta Discontinua..... 83

Figura 40. Operación Incorrecta de la Mezcladora de Paletas..... 84
Figura 41. Sala de Control de la Planta Discontinua..... 86
Figura 42. Disposición Típica del Mezclador de Tambor..... 89
Figura 43. Dispositivo de Muestreo de Cinta Transportadora..... 90
Figura 44. Tanque de Calibración de Ligante Asfáltico Estacionario..... 91
Figura 45. Planta de Mezcla de Tambor de Contraflujo..... 93
Figura 46. Planta de Mezcla de Tambor Unificada (Doble Barril) 93
Figura 47. Secador de Contraflujo con Mezclador Continúo Separado..... 94
Figura 48. Caja de Eliminación (Knockout Box) que Devuelve Finos Gruesos al Secador..... 95
Figura 49. Colector Ciclónico que Devuelve Finos Gruesos al Secador..... 96
Figura 50. Colector de Polvo con Filtro de Mangas (Baghouse)..... 97
Figura 51. Silos de Almacenamiento Aislados..... 98
Figura 52. Tolva de Sobretensión (Surge Bin) Portátil..... 98
Figura 53. Silo de Almacenamiento Portátil..... 99
Figura 54. Dosificador de Silo..... 100
Figura 55. Báscula de Camiones Debajo de las Tolvas de Almacenamiento..... 101
Figura 56. Material Existente Eliminado Antes del Bacheo..... 110
Figura 57. Material Colocado en Parche Localizado..... 110
Figura 58. Compactación del Parche..... 111
Figura 59. Bulto Causado por el Uso Excesivo de Sellador de Grietas..... 112
Figura 60. Fresadora Típica..... 114
Figura 61. Desconchado (Scabbing)..... 114
Figura 62. Riego de Liga en una Superficie Fresada..... 115
Figura 63. Distribuidor Aplicando Riego de Liga..... 117
Figura 64. Aplicación No Uniforme de Riego de Liga..... 118
Figura 65. Aplicación No Uniforme de Riego de Liga..... 119
Figura 66. Aplicación Uniforme de Riego de Liga..... 119
Figura 67. Riego de Liga de Emulsión Aplicado—Riego de Liga Sin Romper (*izquierda*), Riego de Liga Roto (*derecha*)..... 122
Figura 68. Pavimentadora con Rociador (Spray Paver) 123
Figura 69. Distribuidor de Asfalto..... 125
Figura 70. Aplicación de Riego de Liga..... 125
Figura 71. Alineación Correcta de la Boquilla..... 127
Figura 72. Superposición del Abanico de Pulverización..... 128
Figura 73. Camión de Descarga Trasera (End- Dump Truck)..... 137
Figura 74. Camión de Descarga Inferior (Bottom- Dump Truck) 138
Figura 75. Camión de Fondo Móvil (Live-Bottom Truck)..... 139
Figura 76. Ejemplo de Carga de Camión..... 140
Figura 77. Caja de Camión con Lona..... 141
Figura 78. Vehículo de Transferencia de Material (MTV)..... 145
Figura 79. Esquema de la Pavimentadora Asfáltica..... 148
Figura 80. Enganche de Camión en la Parte Delantera de la Pavimentadora..... 149

Figura 81. Tolva de la Pavimentadora Entre Cargas 149
Figura 82. Sistema de Alimentación de Material 150
Figura 83. Tornillo Sinfín (Auger) de la Pavimentadora con Paletas Centrales Reversibles.151
Figura 84. Cámara del Tornillo Sinfín.....152
Figura 85. Cabeza Uniforme de Material a la Altura del Eje.....153
Figura 86. Interruptor de Paleta .....,154
Figura 87. Sensor Sin Contacto..... 155
Figura 88. Alas de Tolva Plegables 156
Figura 89. Tolva de Pavimentadora Mal Gestionada 156
Figura 90. Elevador de Hilera 158
Figura 91. Elevador de Hilera Recogiendo Toda la Hilera 158
Figura 92. Regla de Ancho Fijo con Extensiones Vibratorias Atornillables 159
Figura 93. Pavimentadora con Regla Extensible 160
Figura 94. Punto de Remolque y Línea de Tiro 161
Figura 95. Elementos que Impactan las Fuerzas de la Regla 162
Figura 96. Pavimentación Ancha con una Cabeza Uniforme de Material 165
Figura 97. Distancia Requerida para que la Regla Alcance el Equilibrio 167
Figura 98. Regla Vibratoria 170
Figura 99. Regla con Barra de Apisonamiento (Tamping Bar Screed) 171
Figura 100. Corona de la Regla (Screed Crown) 172
Figura 101. Referencia de Pendiente de Viga Flotante..... 174
Figura 102. Referencia de Pendiente de Rastreador Sónico 175
Figura 103. Sensor de Pendiente Sobre la Regla y Comprobación de Pendiente Transversal...175
Figura 104. Referencia de Pendiente de Punto Único 176
Figura 105. Cordel (Stringline) en un Proyecto de Aeródromo 178
Figura 106. Un Controlador Moderno de Pendiente Transversal 179
Figura 107. Receptores Duales en una Pavimentadora 180
Figura 108. Estación Total Universal Rastreadora de Pavimentadora 181
Figura 109. Regla Empírica del Factor de Reducción por Rodadura para Mezclas de Gradación Densa 182
Figura 110. Rodillo Estático de Acero 191
Figura 111. Rodillo Neumático 192
Figura 112. Fuerzas del Rodillo de Neumáticos (Caucho) 193
Figura 113. Sistema de Rociado de Agua y Alfombras Húmedas en Neumáticos.....195
Figura 114. Rodillo Vibratorio de Doble Tambor 195
Figura 115. Relación Entre Velocidad y Frecuencia de Vibración 198
Figura 116. Rodillo Oscilatorio de Doble Tambor 199
Figura 117. Rodillo Combinado 200
Figura 118. Rodillo Vibratorio de Neumáticos de Caucho 200
Figura 119. Rodillo Equipado con Tecnología IC 201
Figura 120. Rodillo Vibratorio de Doble Tambor Equipado con Tecnología IC 202
Figura 121. Estimación de la Tasa de Enfriamiento del Tapete Asfáltico Durante la Compactación 205
Figura 122. Rodadura de Ruptura con Dos Rodillos Vibratorios 213

Figura 123. Juntas Longitudinales en Pista de Aeródromo 218
Figura 124. Deterioro Prematuro de Juntas Longitudinales 219
Figura 125. Términos Comunes para Juntas Transversales y Longitudinales 220
Figura 126. Colocación de Papel Kraft como Agente Desmoldante en Junta Transversal..... 222
Figura 127. Rodadura del Lado Caliente de una Junta Transversal 225
Figura 128. Pavimentación en Línea Recta con Cordel, Pintura de Omisión y Guía en la Pavimentadora..... 226
Figura 129. No Pavimentar Recto (o Suave en una Curva) Hace Imposible Lograr un Recubrimiento Consistente 226
Figura 130. Juntas Escalonas 227
Figura 131. Diferentes Tipos de Juntas Longitudinales 227
Figura 132.Mala Práctica—Compuerta Final No Configurada para Asentarse en la Superficie Existente 228
Figura 133. Junta de Cuña Dentada con Conicidad en la Parte Superior e Inferior de la Cuña.. 229
Figura 134. Dispositivo de Cuña Dentada que Forma y Compacta a Través de la Vibración de la Regla..... 230
Figura 135. Dos Dispositivos para Compactar la Cuña de una Junta de Cuña Dentada..... 230
Figura 136. Aspectos Clave para Construir una Junta Longitudinal Duradera.....231
Figura 137. Rueda de Corte Montada en un Rodillo 232
Figura 138. Rueda de Corte Fijada al Diente Trasero de una Niveladora 233
Figura 139. Placa de Expulsión (Kick-Out Plate) Ayuda a Retirar la mezcla recortada..... 233
Figura 140. Cordel, Pintura y una Guía Montada Permiten un Corte Recto 234
Figura 141. Dos Opciones para Compactar la Junta Longitudinal No Confinada. 235
Figura 142. Adhesivo de Junta Aplicándose a la Cara de la Junta Fría 236
Figura 143. Superposición Correcta al Colocar el Lado Confinado de una Junta Longitudinal. 237
Figura 144. Emparejamiento (Luting) Incorrecto de la Junta Longitudinal (izquierda), que Priva al Lado Caliente de Material para Rodadura, y Emparejamiento Correcto de la Junta Longitudinal (derecha) 238
Figura 145. Esparcimiento y Emparejamiento Incorrectos a Través de la Junta Longitudinal... 239
Figura 146. Pavimentación en Escalón con Cuatro Trenes de Pavimentación en una Pista en el Aeropuerto DFW 240
Figura 147. Calentadores de Juntas: Autónomo (izquierda) y Montado en Pavimentadora (derecha)..... 242
Figura 148. Selladores de Superficie en Juntas Longitudinales: RPE (izquierda) y Rejuvenecedor VRAM (derecha) 243
Figura 149. VRAM Se Aplica con Caja de Rasado Manual (izquierda) o Distribuidor Modificado (centro), Luego Se Pavimenta Encima (derecha) 243
Figura 150. Extensiones Incorrectas del Tornillo Sinfín y del Túnel Causan Segregación.....246
Figura 151. Ejemplos de Segregación en el Extremo del Camión 247
Figura 152. Ejemplos de Segregación en la Línea Central 248
Figura 153. Segregación Vertical (Parte Superior Diferente a la Parte Inferior de la Sección Transversal) 249
Figura 154. Ilustración de Segregación de Juntas 249

Figura 155. Ejemplo de Segregación del Tapete de Ancho Medio 250
Figura 156. Segregación en el Silo de la Planta 251
Figura 157. Segregación Aleatoria 251
Figura 158. Altura Correcta de la Mezcla en la Caja del Tornillo Sinfín 255
Figura 159. Pavimentadora Equipada con un Escáner Infrarrojo Automatizado 256
Figura 160. Áreas Segregadas (a la derecha) Predichas por Puntos Fríos en el Infrarrojo..... 257
Figura 161. Porcentaje Dentro de los Límites..... 265
Figura 162. Muestreo Puramente Aleatorio vs. Muestreo Aleatorio Estratificado. 272
Figura 163. Ejemplo de Gráfico de Control 277
Figura 164. Mezcla Descargándose del Tambor 279
Figura 165. Textura No Uniforme del Tapete 295
Figura 166. Mala Junta Longitudinal Debido a una Construcción Insatisfactoria.....302
Figura 167. Agrietamiento Fino del Rodillo Durante la Compactación 304
Figura 168. Grietas Finas Causadas por el Agrietamiento Fino del Rodillo 305
Figura 169. Empuje debido a una Mezcla Insatisfactoria 310
Figura 170. Rodadura (Rutting) de una Mezcla Asfáltica Inestable 310
Figura 171. Exudación de Asfalto en el Carril de Circulación 312
Figura 172. Mancha Grasa Causada por Exceso Localizado de Asfalto 313
Figura 173. Mancha Grasa Causada por Derrame de Gasóleo Antes de la Construcción del Recubrimiento 314
Figura 174. Marcas de Rodillo en un Pavimento Asfáltico Recién Colocado 316
Figura 175. Sombras de Rodillo Neumático en un Pavimento Asfáltico Nuevo 316
Figura 176. Marcas de Tabla de Lavar Dejadas por un Rodillo Vibratorio Operado Incorrectamente..... 317

Lista de tablas

Tabla 1. Designaciones MSCR 24
Tabla 2. Requisitos de Propiedades de Consenso de Agregados AASHTO M 323.....29
Tabla 3. Resumen de Enfoques BMD 55
Tabla 4. Temperaturas Típicas de Almacenamiento y Mezclado de Ligante en Planta 65
Tabla 5. Tasas de Aplicación de Riego de Liga Recomendadas—Unidades Consuetudinarias de EE.UU..... 120
Tabla 6. Tasas de Aplicación de Riego de Liga Recomendadas—Unidades Métric..... 120
Tabla 7. Guía de Carga de Productos 126
Tabla 8. Correcciones de Temperatura-Volumen a 60 °F (15.6 °C) para Asfalto Emulsionado. 131
Tabla 9. Velocidad Máxima del Rodillo Frente a la Frecuencia del Tambor (para un rango de 10 a 14 IPF) 197
Tabla 10. Ejemplo de Plan de Muestreo y Prueba de Control de Calidad 270
Tabla 11. Ejemplo de Tabla de Muestreo Aleatorio por Tonelaje 273
Tabla 12. Especificación de Temperatura de Superficie de la FAA 280
Tabla 13. Problemas del Tapete y Sus Causas 288

Lista de abreviaciones

AACP	Programa de Certificación de Asfalto para Aeródromos

AAD	Desviación absoluta promedio
AAPTP	Programa de Tecnología de Pavimento Asfáltico para Aeropuertos
AASHO	Asociación Americana de funcionarios de Carreteras Estatales
AASHTO	Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte
AC	Cemento Asfáltico
AR	Residuo Envejecido
ASTM	ASTM Internacional
ATPB	Base Permeable Tratada con Asfalto
BMD	Diseño de Mezcla Balanceada
DoD	Departamento de Defensa
DOT	Departamento de Transporte
EAP	Imprimación de Asfalto Emulsionado
ESAL	Carga de Eje Simple Equivalente
FAA	Administración Federal de Aviación
FHWA	Administración Federal de Carreteras
FOD	Escombros de Objetos Extraños
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
HMA	Mezcla Asfáltica Caliente
IC	Compactación Inteligente
ICMV	Valor de Medición de Compactación Inteligente
IPF	Impactos por pie
JMF	Fórmula de Mezcla de Trabajo
LAS	Antidesprendimiento Líquido
LJ	Junta Longitudinal
LSL	Límite Inferior de Especificación
MDL	Línea de Densidad Máxima
MOQ	M edida de Calidad
MSCR	Recuperación de Fluencia de Estrés Múltiple
MTV	Vehículo de Transferencia de Material
MUTCD	Manual sobre Dispositivos Uniformes de Control de Tráfico
NAPA	Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos
NCAT	Centro Nacional de Tecnología del Asfalto
NCHRP	Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Carreteras
NMAS	Tamaño Máximo Nominal de Agregado
OBC	Contenido Óptimo de Ligante
OGFC	Curso de Fricción de Gradación Abierta
OSHA	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional
PCC	Hormigón de Cemento Portland
PD	Porcentaje Defectuoso
PG	Clasificado por Desempeño
PLI	Libras por pulgada lineal
PMA	Asfalto Modificado con Polímeros
PWL	Porcentaje Dentro de los Límites
QA	Aseguramiento de la Calidad QC Control de Calidad

RAP	Pavimento Asfáltico Recuperado RAS Tejas Asfálticas Recicladas
RPE	Emulsión de Penetración Rápida
SMA	Asfalto de Matriz Pétrea
TMD	Densidad Máxima Teórica
TRB	Junta de Investigación de Transporte
UFGS	Especificaciones de Guía de Instalaciones Unificadas
USACE	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos
USL	Límite Superior de Especificación
VFA	Vacíos Llenos de Asfalto
VMA	Vacíos en el Agregado Mineral
VPM	Vibraciones por minuto
VRAM	Membrana Asfáltica Reductora de Vacíos
WMA	Asfalto de Mezcla Tibia

1. Introducción

1.1 PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN DEL MANUAL

El propósito de este Manual de Pavimentación Asfáltica es proporcionar información técnica integral y mejores prácticas relacionadas con la pavimentación de mezclas asfálticas, tanto para proyectos de carreteras como de aeródromos. El objetivo es mantener el enfoque en los aspectos prácticos que tienen el mayor efecto sobre la calidad y el rendimiento a largo plazo del pavimento terminado.

El éxito de la pavimentación asfáltica no se logra simplemente con buenas operaciones de colocación y compactación. El éxito también depende de un diseño estructural apropiado, la selección adecuada de materiales, el diseño de la mezcla, la producción en planta, la preparación de la superficie y el aseguramiento de la calidad (QA). El uso de las mejores prácticas en cada una de estas fases da como resultado pavimentos asfálticos construidos para durar.

El Programa de Tecnología de Pavimento Asfáltico para Aeropuertos (AAPTP), un esfuerzo cooperativo entre la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (NAPA) y la Administración Federal de Aviación (FAA), produjo este Manual para aquellos involucrados en la producción, construcción y programas de aseguramiento de la calidad de pavimentación asfáltica. Esto incluye personal que representa al contratista, la agencia usuaria o propietaria y los consultores.,

La discusión del Manual sobre las especificaciones y los métodos de ensayo referenciados está actualizada a la fecha de publicación. Los lectores deben revisar las especificaciones vigentes para verificar cualquier cambio relevante que pueda haber ocurrido desde ese momento.

En particular, el público objetivo incluye inspectores, ingenieros de proyecto, diseñadores, superintendentes, capataces, equipos de pavimentación, operadores de planta y técnicos de ensayo..

La primera edición de este Manual fue publicada en 1991 por la Junta de Investigación de Transporte (TRB) con apoyo financiero de la Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO), la FAA, la Administración Federal de Carreteras (FHWA), la NAPA y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. UU. (USACE). En el año 2000, el Consejo Nacional de Investigación nombró un comité de expertos de agencias, productores y contratistas para actualizar el Manual. Desde su inicio, el Manual ha servido como una referencia venerable y de larga data utilizada en toda la industria de pavimentación asfáltica para promulgar buenas prácticas. Esta edición actual proporciona una actualización muy necesaria para incorporar la última tecnología, equipos, métodos y estándares

La organización de esta última edición ha cambiado sustancialmente con respecto a las ediciones anteriores, y ahora consta de 12 capítulos que cubren el proceso de un proyecto de pavimentación asfáltica de principio a fin. Este Manual incluye muchas referencias "entre capítulos"

donde los temas tienen diferentes aspectos cubiertos en múltiples capítulos. Hacer referencia a la discusión en otro(s) capítulo(s) minimizar la duplicación de discusiones.

Después de esta introducción del Capítulo 1, el Capítulo 2 ofrece una breve revisión de la organización del proyecto. El papel de los materiales y el diseño de la mezcla en relación con el comportamiento de la misma se abordan en el Capítulo 3 . En este mismo capítulo también se discute cómo es probable que el desempeño del diseño de la mezcla en el laboratorio difiera de la mezcla producida en obra, incluyendo un debate sobre los ajustes necesarios.

La producción de la mezcla en la planta se cubre en el Capítulo 4 de una manera más concisa que en las ediciones anteriores del Manual para mantener la proporción con otros temas. El Capítulo 5 trata la preparación adecuada de la superficie a pavimentar, ya sea una nueva base granular o un pavimento de asfalto o concreto existente. Esto incluye detalles sobre capas de imprimación y capas de adherencia (tack coats). La entrega de la mezcla desde la planta hasta el lugar de trabajo se cubre en el Capítulo 6, incluyendo los tipos de equipos y los procedimientos adecuados de carga y descarga.

El Capítulo 7 discute la colocación de la mezcla en la obra. El capítulo cubre equipos, procedimientos y el control de la rasante y la pendiente, incluida la automatización. El Capítulo 8 es un análisis exhaustivo de la compactación de la capa, incluidos los tipos de rodillos, los factores que afectan la compactación y el establecimiento de un patrón de rodadura. Tanto las juntas longitudinales como las transversales se discuten en el Capítulo 9, con gran énfasis en las mejores prácticas para colocar y compactar las juntas

El Capítulo 10 ha sido añadido para proporcionar un debate dedicado y más exhaustivo sobre el tema crítico de la segregación, incluyendo las posibles fuentes y las medidas correctas. El Capítulo 11 cubre el complejo tema de la Garantía de Calidad (QA), proporcionando fundamentos esenciales para las muchas formas en que una agencia aborda el control de calidad (QC) y la aceptación en sus especificaciones y procedimientos. Finalmente, el Capítulo 12 se centra en los muchos posibles problemas de la capa que pueden ocurrir, además de la segregación cubierta en el Capítulo 10.

Para complementar la guía escrita en este Manual, la AAPTP produjo una serie de 30 vídeos que destacan temas claves cubiertos en los capítulos. Filmados en proyectos activos de aeródromos en todo Estados Unidos, estos vídeos de 3 a 5 minutos demuestran las mejores prácticas en el campo y presentan perspectivas de profesionales de la industria. Un icono de vídeo junto a un capítulo o encabezado de sección indica cuándo hay un vídeo relacionado disponible. Se proporciona una lista completa de los vídeos, con enlaces directos, en el Apéndice.

1.2 AIRFIELD PAVING

Las ediciones anteriores (1991 y 2000) de este Manual se centraron en la pavimentación de carreteras. Un cambio importante en esta nueva edición es un mayor énfasis en la pavimentación de aeródromos, con una discusión adicional sobre prácticas únicas para el trabajo en aeródromos. Las diferencias entre la pavimentación de carreteras y la de aeródromos y

1. Introducción

1.1 PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN DEL MANUAL

El propósito de este Manual de Pavimentación Asfáltica es proporcionar información técnica integral y mejores prácticas relacionadas con la pavimentación de mezclas asfálticas tanto para proyectos viales como aeroportuarios. El objetivo es mantener la discusión centrada en los aspectos prácticos que tienen el mayor efecto sobre la calidad y el rendimiento a largo plazo del pavimento terminado.

El éxito de la pavimentación asfáltica no se puede lograr simplemente con buenas operaciones de pavimentación y compactación. El éxito también depende de un diseño estructural apropiado, una selección adecuada de materiales, el diseño de la mezcla, la producción en planta, la preparación de la superficie y el aseguramiento de la calidad (QA). El uso de las mejores prácticas en cada una de estas fases da como resultado pavimentos asfálticos construidos para durar.

El Programa de Tecnología de Pavimentos Asfálticos Aeroportuarios (AAPTP), un esfuerzo cooperativo entre la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (NAPA) y la Administración Federal de Aviación (FAA), produjo este Manual para aquellos involucrados en la producción, construcción y programas de QA de pavimentación asfáltica. Esto incluye al personal que representa al contratista, a la agencia usuaria o propietario, y a los consultores. En particular, la audiencia objetivo incluye inspectores, ingenieros de proyecto, diseñadores, superintendentes, capataces, cuadrillas de pavimentación, operadores de planta y técnicos de pruebas.

La discusión del Manual sobre las especificaciones y métodos de prueba referenciados está actualizada a la fecha de publicación. Los lectores deben revisar las especificaciones actuales para verificar cualquier cambio pertinente que pueda haber ocurrido desde ese momento.

La audiencia objetivo de este Manual incluye inspectores, ingenieros de proyecto, diseñadores, superintendentes, capataces, cuadrillas de pavimentación, operadores de planta y técnicos de pruebas.

La primera edición de este Manual fue publicada en 1991 por la Junta de Investigación del Transporte (TRB) con apoyo financiero de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO), la FAA, la Administración Federal de Carreteras (FHWA), NAPA y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (USACE). En 2000, el Consejo Nacional de Investigación designó un comité de expertos de agencias, productores y contratistas para actualizar el Manual. Desde su inicio, el Manual ha servido como una referencia venerable y duradera utilizada en toda la industria de la pavimentación asfáltica para promulgar buenas prácticas. Esta edición actual proporciona una actualización muy necesaria para incorporar la última tecnología, equipos, métodos y estándares.

La organización de esta última edición ha cambiado sustancialmente con respecto a las ediciones anteriores, consistiendo ahora en 12 capítulos que cubren el proceso de un proyecto de pavimentación asfáltica de principio a fin.

Este Manual incluye muchas referencias "entre capítulos" donde los temas tienen diferentes aspectos cubiertos en múltiples capítulos. Referenciar la discusión en otro(s) capítulo(s) minimiza las discusiones duplicadas.

Siguiendo esta introducción del Capítulo 1, el Capítulo 2 proporciona una breve revisión de la organización del proyecto. El papel de los materiales y el diseño de la mezcla en relación con el comportamiento de la mezcla se cubre en el Capítulo 3. Una discusión sobre cómo el diseño de la mezcla realizado en el laboratorio probablemente diferirá de la mezcla producida en el campo también ocurre en el Capítulo 3, incluyendo alguna discusión sobre los ajustes que serán necesarios.

La producción de la mezcla en la planta se cubre en el Capítulo 4 de una manera más abreviada que en ediciones anteriores del Manual para mantenerla proporcional con otros temas. El Capítulo 5 cubre la preparación adecuada de la superficie sobre la que se pavimentará, ya sea una base granular nueva o un pavimento de asfalto o concreto existente. Esto incluye detalles sobre riegos de imprimación y riegos de liga. La entrega de la mezcla desde la planta al sitio de trabajo se cubre en el Capítulo 6, incluyendo tipos de equipos y procedimientos adecuados de carga y descarga.

El Capítulo 7 discute la colocación de la mezcla en el sitio de trabajo. El capítulo cubre equipos, procedimientos y control de rasante y pendiente, incluyendo la automatización. El Capítulo 8 es una discusión exhaustiva sobre la compactación de la carpeta, incluyendo tipos de rodillos, factores que afectan la compactación y el establecimiento de un patrón de rodado. Tanto las juntas longitudinales como las transversales se discuten en el Capítulo 9, con gran énfasis en las mejores prácticas para colocar y compactar juntas.

El Capítulo 10 se ha agregado para proporcionar una discusión dedicada y más exhaustiva sobre el tema crítico de la segregación, incluyendo posibles fuentes y medidas correctivas. El Capítulo 11 cubre el complejo tema del Aseguramiento de la Calidad (QA), proporcionando fundamentos esenciales para las muchas formas en que una agencia aborda el control de calidad (QC) y la aceptación en sus especificaciones y procedimientos. Finalmente, el Capítulo 12 se enfoca en los muchos problemas posibles de la carpeta que pueden ocurrir, además de la segregación cubierta en el Capítulo 10.

Para complementar la orientación escrita en este Manual, el AAPTP produjo una serie de 30 videos destacando temas clave cubiertos en los capítulos. Filmados en proyectos activos de aeródromos en todo Estados Unidos, estos videos de 3 a 5 minutos demuestran las mejores prácticas en el campo y presentan perspectivas de profesionales de la industria. Un ícono de video junto a un encabezado de capítulo o sección señala cuando hay un video relacionado disponible. Una lista completa de los videos, con enlaces directos, se proporciona en el Apéndice.

1.2 PAVIMENTACIÓN DE AERÓDROMOS

Las ediciones anteriores (1991 y 2000) de este Manual se centraron en la pavimentación de carreteras. Un cambio importante en esta nueva edición es un mayor énfasis en la pavimentación de aeródromos, con una discusión adicional sobre prácticas únicas para el trabajo en aeródromos. Las diferencias entre las prácticas estándar de carreteras y aeródromos se cubren sobre una base temática según se justifique a lo largo del Manual, no

necesariamente como secciones separadas sino como una discusión ampliada. Se pueden hacer referencias tanto a los estándares y especificaciones de pavimentación de aeródromos de la FAA como del Departamento de Defensa (DoD).

Un cambio importante en esta nueva edición del Manual es que pone mayor énfasis en la pavimentación de aeródromos, con una discusión adicional sobre prácticas únicas para el trabajo en aeródromos.

La especificación estándar de pavimentación asfáltica de la FAA para aeródromos es el Ítem P-401 que se encuentra en la circular de advisory circular 150/5370-10H. La especificación estándar de pavimentación asfáltica del DoD para aeródromos es la is Unified Facilities Guide Specification (UFGS) 32 12 15.13. Si bien estas dos especificaciones de aeródromos tienen algunas similitudes con respecto a materiales, granulometrías, juntas, etc., también contienen muchas diferencias, especialmente en lo que respecta al QC y la aceptación.

Por varias razones, los pavimentos de aeródromos presentan desafíos únicos en comparación con los pavimentos de carreteras, y estos desafíos afectan el proceso de pavimentación.

Primero, las presiones de los neumáticos de las ruedas de las aeronaves son mucho mayores que las de los neumáticos de camiones. Las aeronaves comerciales grandes tienen presiones de neumáticos que van desde 150 a 250 libras por pulgada cuadrada (psi), mientras que los camiones grandes tienen presiones de neumáticos que van desde 85 a 110 psi. Las aeronaves de combate militares pueden tener presiones de neumáticos que exceden los 300 psi. Estas presiones de neumáticos extremadamente altas, especialmente cuando se combinan con cargas de movimiento lento o estáticas, pueden hacer que una superficie de asfalto recién pavimentada sea propensa a ahuellamiento, desplazamiento o raspaduras a menos que la mezcla se diseñe, produzca, coloque y compacte de una manera que asegure suficiente estabilidad.

Una segunda razón es que los pavimentos de aeródromos deben diseñarse, construirse y mantenerse de una manera que no produzca daños por objetos extraños (FOD), un término muy familiar para aquellos involucrados en pavimentos y operaciones de aeródromos. FOD es cualquier desecho que puede ser ingerido por un motor a reacción y causar daños, lo que lleva a importantes problemas de seguridad de vuelo, así como a costosas reparaciones del motor. Debido a las preocupaciones por FOD, los pavimentos de aeródromos deben mantenerse en un nivel de servicialidad más alto que los pavimentos de carreteras.

Una tercera razón es que la pavimentación en aeródromos (mostrada en la Figura 1) interrumpe drásticamente las operaciones de tráfico del aeródromo en comparación con la interrupción del tráfico causada por la pavimentación de carreteras. Para la mayoría de las pavimentaciones de carreteras, el tráfico puede desviarse, pero permanecer abierto cerrando uno o unos pocos carriles. Para la pavimentación de aeródromos, generalmente se debe cerrar toda la pista o calle de rodaje porque cerrar un ancho parcial en una pista o calle de rodaje para mantener el tráfico abierto no es una opción.

Una cuarta razón es que las especificaciones de aeródromos típicamente tienen requisitos de lisura muy estrictos, por lo que el proceso de pavimentación requiere más atención que la pavimentación de carreteras "cotidiana".

Todas estas razones y más explican por qué la pavimentación en aeródromos se conoce como el "acto de la cuerda floja" de la pavimentación asfáltica.

La especificación estándar de pavimentación asfáltica de la FAA para aeródromos es el Ítem P-401 que se encuentra en la circular de asesoramiento 150/5370-10H. La especificación estándar de pavimentación asfáltica del DoD para aeródromos es la Especificación Guía de Instalaciones Unificadas (UFGS) 32 12 15.13.

Fuente: Brian K. Wood

F igura 1. Tren de Rodillos Asegurando la Compactación en un Proyecto de Pista

1.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS DEFINIDAS Y CLASIFICADAS

Las mezclas asfálticas consisten en agregado y ligante asfáltico que se mezclan con precisión en una planta de asfalto y luego se colocan y compactan en el sitio de trabajo, típicamente en múltiples capas.

El término "mezclas asfálticas" se usa genéricamente para incluir los diferentes tipos de mezclas de agregado y ligante asfáltico (también referido como betún, asfalto o cemento asfáltico) producidas en una planta de asfalto. Tradicionalmente conocida como "mezcla asfáltica en caliente" (HMA), el cambio de terminología a "mezclas asfálticas" fue impulsado por la introducción de la mezcla asfáltica tibia (WMA). WMA es un término genérico para varios productos y tecnologías incorporados en mezclas asfálticas que permiten temperaturas de mezcla reducidas mientras se mantiene la trabajabilidad necesaria para el mezclado, pavimentación y compactación. Las mezclas asfálticas incluyen HMA y WMA.

Las mezclas pueden clasificarse y producirse con una amplia gama de tipos, tamaños y combinaciones de agregados, cada una con sus propias características adecuadas para una aplicación de diseño específica. Los tipos de mezcla varían dependiendo de las demandas de rendimiento de esa capa (elevación o curso) en la estructura general del pavimento. Los nombres o terminología de las capas pueden variar según la agencia, región del país, etc. En general, capa base se refiere a la capa inferior de asfalto, capa intermedia se refiere a una capa media, y capa superficial o de rodadura es la capa superior. Thinlay es un término utilizado para un recubrimiento delgado de la superficie. En general, se utilizan tamaños de agregado más grandes con contenidos de ligante más bajos en las capas inferiores, mientras que se utilizan tamaños de agregado más pequeños con contenidos de ligante más altos en las capas hacia y en la superficie. Las mezclas que incorporan agregados más grandes no necesariamente poseen mayor resistencia, como se discute en la Sección 3.3.1.

Si bien cada agencia puede tener sus propias designaciones de mezcla únicas, son comunes varias formas de categorizar y nombrar los diversos tipos de mezclas asfálticas. La primera es designando el tamaño máximo nominal del agregado (NMAS) del agregado utilizado en la mezcla. Esto se cubre en el Capítulo 3. La segunda es por tipo de granulometría, de las cuales hay tres: granulometría densa, granulometría abierta y granulometría discontinua. Algunas agencias también incluyen el grado del ligante en su designación de mezcla. Un ejemplo de una designación de mezcla para una agencia es "12.5 mm Superpave con PG 64-22".

Las mezclas de granulometría densa utilizan una granulometría de agregado que está bien distribuida a lo largo de todo el rango de tamaños de partículas de agregado utilizados, desde grueso hasta fino, resultando en una estructura de empaquetamiento de agregado "densa". Superpave y Marshall son los métodos de diseño de mezcla predominantes (discutidos en el Capítulo 3) que producen mezclas de granulometría densa. Las mezclas de granulometría densa son, con mucho, el tipo de mezcla más común utilizado en carreteras y aeródromos. Una forma adicional de categorizar una mezcla de granulometría densa es si es de granulometría fina o gruesa. Esta distinción se hace generalmente por si la línea de granulometría cae por encima o por debajo de la línea de máxima densidad (MDL) en la curva de potencia 0.45, como se discute en el Capítulo 3. Por ejemplo, un "19-mm fino" típicamente significa que la mezcla tiene un NMAS de 19 mm con una granulometría densa fina.

Las mezclas de granulometría abierta consisten en un agregado con partículas gruesas de tamaño principalmente uniforme y vacíos de aire altamente interconectados. El propósito principal de estas mezclas es servir como una capa de drenaje, ya sea en la superficie del pavimento o en el fondo de la sección estructural del pavimento. Las mezclas de la capa de drenaje superficial se llaman capa de fricción de granulometría abierta (OGFC) o capa de fricción permeable. Las OGFC se diseñan y colocan como una capa superficial para proporcionar una superficie de drenaje libre para prevenir el hidroplaneo, reducir las salpicaduras de los neumáticos y reducir el ruido de los neumáticos. Las mezclas OGFC típicamente tienen un NMAS de 12.5 mm o 9.5 mm. El segundo tipo de mezcla de granulometría abierta se llama base permeable tratada con asfalto (ATPB). Las ATPB se diseñan con bajo contenido de ligante asfáltico y predominantemente agregado de gran tamaño, como NMAS de 25 mm o más grande. Las ATPB se colocan en el fondo de la estructura de asfalto y se atan a drenajes de borde para que cualquier agua que entre en la sección estructural del pavimento, ya sea desde la superficie o subsuperficie, pueda escapar a los drenajes de borde.

Las mezclas de granulometría discontinua consisten en una granulometría de agregado con partículas más grandes y más finas, pero pocas o ninguna partícula en el medio de la banda de granulometría, lo que crea una "brecha" o discontinuidad. El asfalto de matriz de piedra (SMA) es un ejemplo común de una mezcla de granulometría discontinua. Las mezclas SMA funcionan de manera similar a las mezclas de granulometría densa en que proporcionan capas densas e impermeables cuando se compactan adecuadamente. Son conocidas por ser altamente resistentes al ahuellamiento debido a su estructura de agregado piedra sobre piedra y por su mayor durabilidad debido a una película de asfalto más gruesa que recubre el agregado.

La Sección 3.3.1 en el Capítulo 3 tiene una discusión complementaria y más extensa sobre la distribución del tamaño de partículas, incluyendo ilustraciones de estos tres tipos de mezcla por granulometría, así como por NMAS.

1.4 MANO DE OBRA

Varios factores importantes de construcción afectan directamente el rendimiento final de los pavimentos asfálticos: el diseño estructural de las capas del pavimento; las calidades del ligante, agregado y diseño de la mezcla; los procedimientos de construcción utilizados para producir, transportar, colocar y compactar la mezcla; y la mano de obra o calidad de la construcción. La mala mano de obra puede ser uno de los factores más significativos que conducen al deterioro prematuro de un pavimento asfáltico.

Para asegurar que los pavimentos funcionen como se espera, no hay sustituto para la adherencia cuidadosa a las mejores prácticas por parte de todos los involucrados con la pavimentación asfáltica en todas las fases de un proyecto, como se describe en este Manual.

Las causas de la mala mano de obra frecuentemente incluyen el incumplimiento de las especificaciones, técnicas de construcción deficientes y configuración y operación inadecuadas del equipo. La capacitación adecuada del personal de construcción es clave para una buena mano de obra también. El personal de la planta de mezcla y del tren de pavimentación debe comprender los procesos y procedimientos fundamentales, así como las consecuencias de no realizar estas mejores prácticas. Por ejemplo, si los operadores de rodillos no observan las zonas de temperatura durante la compactación, podría resultar en áreas de pavimento que tienen baja densidad compactada y riesgo de fallas prematuras del pavimento, lo que se traduce en FOD en los aeródromos.

Las decisiones de gestión del proyecto también pueden conducir a una mala mano de obra. Por ejemplo, si se permite que la pavimentación proceda durante las inclemencias del tiempo, puede resultar una compactación inadecuada a pesar de la práctica adecuada por parte de los operadores del equipo. De manera similar, si la operación de pavimentación se mueve demasiado rápido, puede exceder la tasa de entrega de material. Esto resulta en paradas frecuentes del tren de pavimentación, lo que a su vez puede causar rugosidad innecesaria en el pavimento y densidad no uniforme.

El desempeño adecuado de todas las tareas relacionadas con la construcción, incluyendo pruebas e inspección, asegura que la mezcla asfáltica producida, colocada y compactada funcionará como se espera. Los procedimientos de Control de Calidad (QC) y aceptación, como los descritos en el Capítulo 11 de este Manual, identificarán casos de mala mano de obra. Estos casos deben corregirse tan pronto como sea posible. El Capítulo 12 de este Manual tiene la intención de ayudar a identificar las causas de los problemas de la carpeta y ofrece ajustes recomendados para prevenir la continuación del problema.

No hay sustituto para la adherencia cuidadosa a las mejores prácticas por parte de todos los involucrados con la pavimentación asfáltica en todas las fases de un proyecto, como se describe en este Manual.

1.5 PROGRAMAS DE CERTIFICACIÓN Y ACREDITACIÓN

Los programas de certificación y acreditación tienen la intención de aumentar la calidad de la construcción asegurando que los miembros del equipo del proyecto y los laboratorios tengan conocimientos sobre varios temas en materiales asfálticos, muestreo, pruebas, pavimentación, QC y aceptación. La certificación se aplica a los individuos, mientras que la acreditación o calificación se aplica a los laboratorios. Ambos están típicamente vinculados a los requisitos y estándares específicos de una agencia.

Hay varios programas de certificación en todo Estados Unidos. Muchas agencias estatales tienen sus propios programas de certificación para los diversos roles individuales involucrados en un proyecto de pavimentación asfáltica, desde técnico de muestreo y pruebas hasta inspector y diseñador de mezclas.

Un ejemplo de un programa nacional de certificación que ha sido adoptado para proyectos de aeródromos militares es el Programa de Certificación de Asfalto para Aeródromos (AACP). Las tres certificaciones disponibles bajo el AACP son Técnico de Laboratorio, Gerente de QC e Inspector. Esencialmente, la especificación UFGS 32 12 15.13 requiere que un contratista tenga al menos un individuo con cada una de estas certificaciones en su personal de QC, y el individuo debe participar activamente en ese rol respectivo durante la ejecución del proyecto.

AASHTO y ASTM International ofrecen programas nacionales de acreditación y competencia de laboratorios. Estos programas tienen la intención de aumentar la competencia y precisión y reducir la variabilidad en ciertas pruebas de laboratorio.

2. Organización del proyecto

2.1 INTRODUCCIÓN

La parte más esencial de la planificación y organización del proyecto es la comunicación. Si bien cada agencia puede tener su propia política y procedimientos detallados sobre cómo se organizan los proyectos, hay aspectos comunes que pueden destacarse. Este capítulo discute cinco aspectos clave de la organización del proyecto y cómo la comunicación efectiva es un elemento vital de cada uno.

1. Documentos del proyecto, instrucciones escritas, producidas antes de que se anuncie el proyecto, que deben describir los requisitos clara y detalladamente.
2. Conferencias de preconstrucción las cuales inician la comunicación verbal entre los representantes de la agencia y el personal del contratista. Esta conferencia establece el tono tanto para la relación de trabajo como para las comunicaciones directas durante la ejecución del proyecto.
3. Comunicación continua entre el contratista y la agencia es esencial para asegurar un trabajo de alta calidad.
4. Registros continuos proporcionan un medio de seguimiento y comunicación de eventos, progreso, resultados de pruebas y rendimiento general. Estos registros típicamente se producen diariamente.
5. Seguridad en el trabajo requiere buena comunicación entre todas las partes.

2.2 DOCUMENTOS DEL PROYECTO

Los documentos del proyecto son desarrollados por el equipo de diseño y son parte de la licitación. Estos documentos ilustran y describen el alcance del trabajo a realizar bajo el contrato. Las definiciones específicas de estos documentos y otros términos que se aplican directamente a un proyecto normalmente se incluyen en la primera sección de las especificaciones estándar vigentes. Los documentos del proyecto incluyen lo siguiente:

- Planos: Dibujos que muestran la ubicación y diseño del proyecto, secciones transversales del pavimento, dimensiones del trabajo, accesorios de la carretera o aeródromo, señalización y control de tráfico, y otros detalles del trabajo a realizar.
- Especificaciones estándar: Documentos técnicos escritos que proporcionan requisitos técnicos detallados para los materiales, productos y métodos utilizados para realizar el trabajo descrito en los planos. Estas especificaciones están diseñadas para asegurar que el pavimento funcione adecuadamente para su uso previsto. Algunas pueden delinear criterios de rendimiento para lograr el resultado deseado. Las especificaciones estándar generalmente son publicadas por una agencia como un volumen de muchas especificaciones que la agencia posee y actualiza periódicamente. Las categorías de especificaciones estándar incluyen materiales, construcción, QA y rendimiento.
- Especificaciones especiales o suplementarias: Adiciones y revisiones aprobadas a las especificaciones estándar. Estas son típicamente especificaciones más nuevas adoptadas desde que se publicó el último volumen de especificaciones estándar.

- Disposiciones especiales: Adiciones o revisiones a las especificaciones estándar o suplementarias que son aplicables solo a un proyecto individual.

Las agencias a menudo incorporan varios otros documentos por referencia en las especificaciones estándar, especificaciones suplementarias y disposiciones especiales. Las especificaciones de materiales y procedimientos de prueba de AASHTO y ASTM a menudo se enumeran en las especificaciones y se convierten en parte de los documentos del contrato. Documentos adicionales, como el Manual de Dispositivos de Control de Tráfico Uniforme (MUTCD) de la Administración Federal de Carreteras y las regulaciones de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), se tratan de la misma manera cuando se hace referencia en las especificaciones. Para aeródromos, la AC 70/7460-1K Señalización e Iluminación de Obstrucciones es un documento importante para equipos de construcción, etc.

Muchas de las especificaciones de materiales y métodos de prueba escritos por AASHTO o ASTM para uso nacional son modificados por agencias estatales o locales para su uso específico. Las agencias gubernamentales a menudo publican sus propias especificaciones de materiales y métodos de prueba. Estas publicaciones también se referencian y se convierten en parte de los documentos del contrato. Los manuales o pautas de inspección normalmente están destinados para uso de los representantes de la agencia y no son parte de los documentos del contrato.

Si existe una discrepancia entre las instrucciones y especificaciones en cualquiera de los documentos del contrato, el orden de prioridad, de mayor a menor, es generalmente el siguiente:

1. Disposiciones especiales.
2. Planos.
3. Especificaciones especiales o suplementarias.
4. Especificaciones estándar.

Esta jerarquía corresponde a la aplicabilidad específica de los documentos a un proyecto o contrato. Los planos y especificaciones deben ser precisos y completos, y deben dejar poco espacio para suposiciones o interpretación. Los documentos de contrato precisos y completos resultan en ofertas integrales, ahorran muchas horas de discusión posterior entre representantes de la agencia y del contratista, y a menudo previenen disputas contractuales que son costosas y consumen mucho tiempo para todas las partes. Para asegurar que el alcance completo del proyecto esté completamente catalogado, se deben incluir en el proceso de licitación reuniones previas a la oferta y un tiempo permitido para preguntas escritas previas a la oferta y respuestas oficiales.

Si se utilizan especificaciones de QA, los requisitos para que el contratista monitoree su propio trabajo y para que la agencia o entidad designada realice las pruebas de aceptación necesarias deben proporcionarse en detalle. Los documentos del proyecto deben indicar claramente los métodos y frecuencias de prueba.

El Capítulo 11 está dedicado al tema de QA, con secciones sobre definiciones, tipos generales de especificaciones, planes de QC, métodos de muestreo y QC en la planta y en el campo, así como aceptación.

2.3 CONFERENCIA DE PRECONSTRUCCIÓN

Se debe realizar una conferencia de preconstrucción (o reunión previa a la pavimentación) antes de que comience el trabajo en un proyecto, a tiempo para permitir la discusión, aclaración y cualquier cambio acordado. Esta conferencia es una oportunidad para ayudar a todas las partes a comprender las responsabilidades de los representantes del propietario y del personal del contratista. Se deben cubrir los detalles del proyecto para que todas las partes afectadas entiendan el "quién, qué, por qué, cuándo, dónde y cómo".

Construir un proyecto de pavimentación exitoso es una asociación entre todas las partes involucradas, con el objetivo de entregar un resultado de alta calidad como producto del trabajo en equipo. La buena comunicación es clave, y la conferencia de preconstrucción establece el tono para la futura comunicación y cooperación. Es importante que todos los aspectos del trabajo se discutan a fondo, se aborden las áreas problemáticas potenciales y se traten las preguntas o inquietudes. Es posible que no todas las respuestas estén disponibles durante la reunión, pero se pueden asignar elementos de acción para proporcionar las respuestas más tarde cuando estén disponibles. Una buena práctica es incluir una fecha proyectada para cuando se debe responder cada pregunta para evitar que las preguntas se olviden.

Los asistentes a esta reunión incluyen personal clave que representa al propietario, contratista, subcontratistas, empresas de pruebas, consultores, etc. Los títulos del personal clave incluyen ingeniero, gerente de proyecto, inspector, técnico de pruebas, superintendente, capataz de pavimentación y gerente de planta. Para proyectos de aeródromos, la gerencia del aeropuerto y las operaciones del aeropuerto deben estar representadas para discutir el acceso al aeródromo, seguridad, protección, etc. Se deben compartir listas de personal clave asignado al proyecto entre el propietario y el contratista, con líneas claras de autoridad y líneas de comunicación delineadas.

La agencia es responsable de convocar y realizar esta reunión de preconstrucción. El personal de la agencia delineará el alcance del proyecto, revisando la información proporcionada en los documentos del contrato. Los representantes de la agencia también deben discutir cualquier aspecto inusual del trabajo—elementos que no son prácticas de construcción rutinarias. La agencia debe revisar los requisitos de prueba y muestreo para asegurar que todos los involucrados en el proyecto entiendan lo siguiente:

- Propósito de todas las pruebas.
- Frecuencia de las pruebas y toma de muestras de material.
- Responsabilidad de realizar las pruebas y/o tomar las muestras.
- Ubicación de las pruebas o muestras de material.
- Detalles sobre el manejo, transporte y prueba de muestras de material.

- Plazo y procedimientos para reportar resultados de pruebas y a quién deben reportarse.
- Respuesta a pruebas fallidas, incluyendo sanciones, paro de obra, etc.

Las personas que representan al contratista deben estar familiarizadas con todos los aspectos del trabajo y poder hablar con autoridad sobre sus planes para realizar el trabajo. Se debe presentar y discutir un cronograma de progreso para el trabajo con los representantes de la agencia. Se deben plantear preguntas sobre el contenido de los documentos del contrato y solicitar aclaraciones. Debido a que la continuidad de las operaciones de pavimentación asfáltica es crítica para proporcionar un pavimento de calidad, el personal del contratista debe incluir elementos como fuentes de materiales, tasas de producción de la planta, distancias y rutas de acarreo, secuencia de pavimentación, anchos y velocidad de pavimentación, tipo y cantidad de equipo a utilizar, etc.

El plan de QC del contratista es el proceso que el contratista utilizará para asegurar que la calidad esté controlada, y también debe discutirse durante la conferencia de preconstrucción. En particular, se deben cubrir las pruebas que caen bajo el QC, incluyendo cómo se recopilan, reportan y quizás se utilizan los datos de QC como parte de la aceptación. El Capítulo 11 discute el QC como parte del QA.

Típicamente, en grandes proyectos y para todos los proyectos de aeródromos, las especificaciones requieren la construcción de una sección de prueba antes de la producción completa de mezcla asfáltica y operaciones de pavimentación. El propósito de la sección de prueba (también referida como franja de control, franja de prueba, etc.) es evaluar el cumplimiento de la fórmula de trabajo (JMF), producción de mezcla, transporte, colocación y compactación en relación con los requisitos en los documentos del proyecto. Cuando el proyecto especifica este enfoque, la producción completa no debe comenzar hasta que se haya construido una sección de prueba aceptable y haya sido aceptada por el propietario.

Uno de los elementos más importantes a tratar en la conferencia de preconstrucción es la seguridad laboral, un tema que también se cubre al final de este capítulo. La seguridad es responsabilidad de todos los involucrados en el proyecto. La discusión de este tema debe incluir no solo la seguridad de quienes trabajan en el trabajo (contratista, subcontratistas y personal de la agencia) sino también la seguridad del público viajero y cualquier tráfico que probablemente opere en las cercanías de la zona de trabajo (por ejemplo, aviones). Se debe delinear una responsabilidad clara para el mantenimiento de todos los dispositivos de control de tráfico, como señales, marcas en el pavimento y señalización manual. El nombre del representante del contratista responsable de la seguridad debe proporcionarse a la agencia para que se puedan lograr comunicaciones rápidas y claras en caso de que ocurran problemas de seguridad. Para

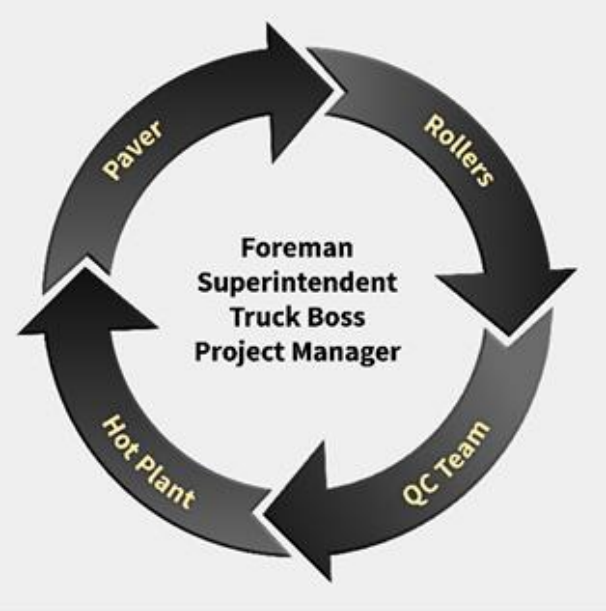
Se debe realizar una conferencia de preconstrucción (o reunión previa a la pavimentación) antes de que comience el trabajo en un proyecto, a tiempo para permitir la discusión, aclaración y cualquier cambio acordado. Esta conferencia es una oportunidad para ayudar a todas las partes a comprender las

aeródromos en particular, se debe discutir un plan de respuesta a emergencias ya que el acceso al sitio generalmente está estrictamente controlado en comparación con las carreteras.

2.4 COMUNICACIÓN CONTINUA

Ver video:
Communication on Airfield Projects

La comunicación no puede detenerse una vez que la conferencia de preconstrucción ha terminado. La calidad del trabajo de pavimentación, junto con la seguridad de quienes realizan e inspeccionan el trabajo, está directamente relacionada con la calidad de la comunicación continua entre todas las partes involucradas. Es importante que las personas a cargo diario del proyecto tanto para la agencia como para el contratista se reúnan periódicamente, tanto de manera formal como informal, para discutir el progreso y la calidad del trabajo realizado hasta la fecha y el cronograma para el trabajo futuro. Se deben establecer líneas claras de comunicación, como se ilustra en la Figura 2, con respecto al QC.



Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 2. Líneas de Comunicación para el Control de Calidad

2.4.1 Reuniones Formales

La frecuencia de las reuniones formales de actualización depende del alcance y el tamaño del trabajo de pavimentación. En un proyecto importante, estas deben realizarse en un horario programado regularmente al menos una vez por semana, como todos los lunes por la mañana en la oficina del proyecto. El personal clave tanto de la agencia como del contratista debe estar presente, y se debe presentar y discutir un cronograma actualizado de "mirada hacia adelante" para que todas las partes puedan planificar y coordinar adecuadamente. La reunión debe ser realizada conjuntamente por la agencia y el contratista y servir como un foro para aportes constructivos al trabajo. Se deben tomar actas escritas de la reunión y distribuirlas a las partes interesadas.

La discusión debe incluir elementos como la cantidad de trabajo completado y los resultados de las pruebas obtenidos. La reunión también debe centrarse en lo que aún no se ha logrado y el cronograma para las próximas semanas. Cualquier cambio en personal, equipo, construcción,

Figura 2. Diagrama circular que muestra las líneas de comunicación: Pavimentadora -> Rodillos -> Equipo de QC -> Planta de Asfalto

métodos y JMF deben discutirse. Los problemas que han surgido y los que se anticipan deben comunicarse a ambas partes, con soluciones exploradas. La seguridad también debe ser revisada.

2.4.2 Reuniones Informales

Las reuniones informales deben realizarse diariamente entre las personas a cargo del trabajo para la agencia y el contratista. Idealmente, estas reuniones deben ocurrir en un horario programado regularmente y pueden realizarse en la planta de asfalto o en el sitio de pavimentación. El propósito de estas reuniones informales es doble. Primero, se deben discutir y resolver los sucesos del día anterior, como el trabajo completado, los resultados de las pruebas y cualquier área problemática encontrada, incluidos los problemas generales de seguridad. Segundo, la discusión debe abordar lo que se espera que suceda ese día y en los próximos días. Varios aspectos del plan general de seguridad y los peligros específicos del proyecto deben incluirse en estas reuniones diarias. Proporcionar puntos clave de cualquier reunión formal reciente también es importante.

Los proyectos de pavimentación asfáltica, como muchos proyectos de construcción, no siempre se llevan a cabo según lo programado originalmente. Los cambios ocurren debido a problemas con el suministro de materiales, averías de equipos, horarios de contratistas y subcontratistas, y condiciones climáticas. Cuando ocurren tales cambios, es importante que se comuniquen entre el contratista y la agencia. Las reuniones informales diarias proporcionan un foro para el intercambio de dicha información. El equipo también necesita apreciar que los proyectos de pavimentación son singularmente dinámicos: las zonas de trabajo son móviles y están llenas de docenas de piezas de equipo en movimiento, incluidos camiones que entran y salen, y a menudo se extienden a lo largo de miles de pies.

La Sección 2.6 incluye una discusión adicional sobre las sesiones informativas diarias de seguridad.

2.4.3 Formatos de Comunicación

Las comunicaciones pueden ser orales, electrónicas y escritas. Mucha información se puede comunicar en forma oral, pero la discusión de información importante, incluido un cambio de condiciones o modificaciones del contrato, debe ser por escrito. Los problemas deben resolverse rápidamente para que no obstaculicen el cronograma del proyecto y pongan en riesgo los costos, la eficiencia o la seguridad del proyecto.

El personal tanto de la agencia como del contratista debe mantener diarios y fotografías de los eventos que ocurren. Los sucesos anotados en un diario pueden necesitar ser recordados más tarde, y un registro escrito puede ayudar a mantener los detalles precisos y completos. La Sección 2.5 contiene una discusión más exhaustiva sobre los diarios.

Las herramientas electrónicas de gestión de proyectos están disponibles para ayudar con la comunicación del proyecto y la documentación necesaria del proyecto.

2.5. REGISTROS CONTINUOS

Se necesitan registros precisos y completos para todos proyectos de construcción. Esto es válido tanto para el ingeniero y el personal del proyecto como para el superintendente general del contratista, los superintendentes de planta y pavimentación, y todos los capataces. Intentar reconstruir con precisión los acontecimientos a posteriori sin las notas, fotografías y datos de pruebas completos adecuados es casi imposible. Además, tomar fotografías y vídeos con marcas de fecha y hora, y posiblemente geolocalizaciones, para documentar un proyecto de pavimentación puede resultar muy valioso cuando se revisa el proyecto. Las opiniones contradictorias sobre lo que ocurrió son comunes cuando las prácticas de registro son deficientes. Siempre se debe seguir una regla general: Si hay dudas sobre si la información es importante o beneficiosa, hay que registrarla.

La mano de obra es muy importante, ya que muchos problemas están relacionados con cuestiones de mano de obra y se identifican visualmente antes de que se determinen mediante pruebas. La mano de obra se trató en la sección 1.4

Tomar fotografías y vídeos con marcas de fecha y hora, y posibles geolocalizaciones, para documentar un proyecto de pavimentación puede resultar muy valioso cuando se revisa el proyecto.

2.5.1 Informes de la planta

Se deben registrar los resultados de todas las pruebas diarias y periódicas realizadas en la planta de asfalto. Para ello se pueden utilizar diferentes formularios. El personal del contratista debe completar y conservar sus propios registros, incluso si la agencia no lo exige.

Los datos que deben registrarse incluyen el número de proyecto y la información sobre la ubicación, las fuentes de materiales del proyecto, la información sobre JMF, los datos de las pruebas de gradación de los áridos y contenido de asfalto, la temperatura de la mezcla, los resultados de las pruebas de la mezcla, las cantidades de materiales utilizados (áridos, ligante asfáltico y aditivos), el número de toneladas de mezcla asfáltica producidas, las condiciones meteorológicas diarias y la ubicación del pavimento donde se colocó la producción diaria (véase la figura 3). Las especificaciones de la agencia pueden requerir información adicional, como el contenido de humedad de las pilas de áridos individuales. Cualquier dato de este tipo que se requiera debe consignarse en los formularios correspondientes.

Es importante registrar en el formulario la fecha, la hora y la ubicación de todas las muestras tomadas, así como el nombre de la persona que las tomó. Se debe anotar cualquier información adicional relacionada con la muestra. Por ejemplo, si las gradaciones de los áridos se determinan a partir de muestras tomadas en dos lugares diferentes (por ejemplo, de la cinta de alimentación en frío y de la mezcla extraída), esos lugares deben marcarse en el informe. Los resultados de las pruebas que no sean satisfactorios deben resaltarse en el formulario, así como las medidas que se deben tomar.

La mayoría de los formularios deben tener un apartado de «Observaciones». Esta parte del formulario debe utilizarse para indicar cualquier acontecimiento inusual o resultado de las pruebas que haya tenido lugar durante la jornada. Deben indicarse las medidas correctivas o los cambios en los materiales, las condiciones de funcionamiento de la planta o los procedimientos de prueba, así como los resultados de dichas medidas o cambios.

HMA Plant QC Report

Date: _____ Test Report No: _____ Project: _____ Time:_____ Lot No: _____
Sublot No: _____ Location Mix Placed: _____ Sample Location (truck, paver, in-place): _____

Asphalt Cement

Grade _____ Source _____ Design Content _____ Measured Content _____

Test Method _____

Aggregate

Source of Aggregate (stockpiles, cold feed, extraction, ignition): _____

Washed or dry gradation? _____

Sieve Size	JMF Percent Passing	Measured Percent Passing
37.5 mm		
25 mm		
19 mm		
12.5 mm		
9.5 mm		
4.75 mm		
2.36 mm		
1.18 mm		
0.6 mm		
0.3 mm		
0.15 mm		
0.075 mm		

Aggregate	Source	% Used
1		
2		
3		
4		
5		

Fine Aggregate Angularity: _____

Coarse Aggregate Angularity: _____

Percent Flat & Elongated (5 to 1): _____

Mix Testing

No. of gyrations @ Nd: _____ Laboratory Compaction Temp: _____ Bulk Specific Gravity: _____

Voids @Nd: _____ Voids filled @ Nd: _____ VMA @ Nd: _____

% Gmm @ Ni: _____ % Gmm @ Nd: _____ % Gmm @ Nmax: _____

Maximum Theoretical Specific Gravity: _____ Retained Tensile Strength (percent): _____

Sample obtained and tested by: _____

Fuente: Manual de pavimentación con asfalto mezclado en caliente 2000, 2.ª edición

Figura 3. Ejemplo de informe de planta

2.5.2 Resultados de las pruebas de campo

Las pruebas de campo se realizan simultáneamente con las operaciones de pavimentación. Consulte el capítulo 11 sobre QA para obtener más detalles sobre esta fase de las pruebas. En los proyectos que utilizan una especificación QA, tanto el contratista como los representantes del propietario realizarán pruebas y realizarán un seguimiento de los resultados. La clave es realizar un seguimiento de todos los resultados de las pruebas para evaluar el rendimiento del contratista en relación con los requisitos de QA. Esto permite al contratista ajustar sus procesos según sea necesario para maximizar la calidad del producto y al propietario tener confianza en lo que está comprando.

Ambas partes deben registrar la información sobre lo que ocurrió en el lugar de la pavimentación durante las operaciones de colocación y compactación de la mezcla. La forma de esta información puede diferir entre el inspector de pavimentación de la agencia y el superintendente del contratista, pero esencialmente ambos deben informar de la misma información. Esta consistencia permitirá mantener debates más significativos posteriormente si se producen deficiencias en los resultados de las pruebas o en el rendimiento de la mezcla bajo el tráfico.

La compactación del terreno se considera ampliamente como la propiedad de construcción más importante para el rendimiento a largo plazo de un pavimento asfáltico. Una mezcla densamente compactada será impermeable tanto al agua como al aire, resistiendo los efectos del envejecimiento del medio ambiente. La mezcla alcanza su mejor capacidad para soportar las cargas repetidas del tráfico cuando esta apropiadamente densificada. Véase el capítulo 8 para obtener más información sobre la compactación.

Los datos relativos a la compactación en campo deben incluir lo siguiente: número y ubicación del proyecto; tipo y número de toneladas de cada mezcla colocada y su ubicación exacta (número de capa, espesor, carril y número de estación); la ubicación (tanto transversal como longitudinalmente, número de estación) de cualquier prueba realizada; y los resultados de densidad y el método por el que se obtuvieron.

Otra información del proyecto que debe registrarse incluye las condiciones meteorológicas; el tipo y la marca del equipo de compactación utilizado por el contratista; los ajustes del rodillo en cuanto a amplitud, frecuencia, presión de los neumáticos y peso del lastre; el tipo, la cantidad y la ubicación de cualquier material de capa de adherencia colocado; el total acumulado de toneladas de cada mezcla colocada en el proyecto; y los resultados de suavidad obtenidos.

Todas las muestras tomadas también deben identificarse claramente en el formulario para reflejar el lugar donde se recogió el material, la hora y la fecha del muestreo, el motivo por el que se tomó la muestra, la cantidad de material que representa la muestra y el nombre de la persona que tomó la muestra. Las fotografías y/o vídeos de las pruebas y los materiales recogidos son muy valiosos. Si se ha utilizado un medidor nuclear o no nuclear para determinar la densidad relativa de la mezcla, se debe hacer referencia a cualquier procedimiento de calibración utilizado para comprobar la fiabilidad del medidor. Se deben resaltar los resultados de las pruebas que no hayan sido satisfactorios. El área «Observaciones» del formulario del informe sobre el pavimento debe utilizarse para informar de cualquier condición o resultado de prueba inusual que se haya producido durante la jornada. Si es posible, se debe proporcionar una explicación de los resultados de las pruebas que no hayan sido satisfactorios y se deben anotar las medidas adoptadas para corregir el problema, junto con sus resultados.

La compactación in situ se considera ampliamente como la propiedad de construcción más importante para el rendimiento a largo plazo de un pavimento asfáltico. Una mezcla bien compactada y de gran densidad será impermeable al agua y al aire, resistiendo los efectos del envejecimiento del medio ambiente.

Si bien la densidad del pavimento es el factor más importante para controlar su rendimiento futuro, también es necesario lograr su suavidad y nivelación para la comodidad y seguridad de los usuarios del pavimento. Además, se ha demostrado que los pavimentos lisos duran más que los rugosos, y es necesaria una nivelación adecuada para garantizar el drenaje. Para determinar la suavidad general de un pavimento se suelen utilizar vehículos de recogida de datos automatizados, pero el uso de reglas rectas tradicionales de 3 metros o más sigue teniendo su lugar.
Es decir, se necesita una regla larga y recta para verificar que las juntas transversales sean lisas. El capítulo 9 ofrece detalles sobre la construcción adecuada de las juntas, mientras que el capítulo 11 proporciona una explicación sobre la lisura.

2.5.3 Diario diario

Todos los supervisores del proyecto, tanto de la agencia como del contratista, deben llevar un diario detallado para su posible consulta posterior. Este documento debe utilizarse para registrar toda la información pertinente sobre las condiciones y la producción de las actividades de cada día. Cualquier cambio que se realice en el modo de funcionamiento de la planta de asfalto o en el equipo de colocación y compactación debe documentarse junto con el motivo del cambio. El diario debe registrar las condiciones meteorológicas de cada día, con información meteorológica actualizada que se añada periódicamente según sea necesario a lo largo de cada día.

El diario también debe documentar cualquier evento no rutinario que ocurra en el trabajo, incluyendo las visitas al proyecto. También debe utilizarse para registrar las razones de cualquier retraso en la pavimentación (por ejemplo, una avería en el equipo o malas condiciones meteorológicas) y la duración del retraso.

Se recomienda el uso de fotografías y vídeos con marca de tiempo y geolocalización para documentar mejor un proyecto. Entre los elementos que suelen documentarse con fotografías y vídeos en la instalación de la planta de asfalto se incluyen las reservas de áridos, el lugar de pavimentación, el control del tráfico, la entrega de la mezcla, las operaciones de pavimentación, la construcción de juntas y el proceso de compactación. Las cámaras térmicas portátiles o los accesorios para teléfonos inteligentes son económicos y pueden ser herramientas muy valiosas para la documentación.

Para que la información contenida en un diario sea precisa y significativa, debe registrarse a medida que se producen los acontecimientos o poco después. El diario debe ser una de las primeras actividades de cada jornada laboral y debe actualizarse al menos dos veces al día: una vez al mediodía y otra al final de la jornada. Si las condiciones y los horarios de trabajo impiden realizar la entrada del mediodía, los acontecimientos del día deben registrarse siempre al finalizar las actividades de cada jornada.

La información contenida en el diario debe ser lo más detallada y completa posible. Si se mantiene una conversación sobre la actividad del proyecto con otro personal del proyecto, ya sea personal de la agencia o empleados del contratista, se debe registrar la fecha y el lugar de la conversación. Se deben anotar los nombres y cargos de todas las personas que participan en la conversación, así como los temas tratados. Si se producen cambios en el alcance del trabajo y/o los costes

debido a las conversaciones sobre el proyecto, es esencial documentar oficialmente cualquier acuerdo alcanzado y elaborar una orden de cambio por escrito y firmada a su debido tiempo, normalmente antes de que se lleven a cabo los cambios.

No se puede subestimar la importancia de la información contenida en el diario. No es posible que haya
«demasiada» documentación. Un diario típico sería un cuaderno encuadernado con páginas numeradas consecutivamente. Si una de las partes en una disputa puede presentar información escrita de manera oportuna en un diario, mientras que la otra solo puede basarse en su memoria para reconstruir los hechos, el propietario del diario suele tener ventaja en la resolución del desacuerdo. La información del diario también puede ser útil para realizar investigaciones de seguimiento y determinar las razones de los problemas prematuros en el rendimiento del pavimento.

Cada vez es más habitual documentar los diarios de forma electrónica mediante fotos, notas electrónicas, notas de voz, etc. Esta documentación electrónica debe almacenarse de forma cuidadosa y regular en un servidor accesible, en un formato que pueda ser leído por todos.

2.6 SEGURIDAD

Watch Video:
Safety on Asphalt Projects

Trabajar en una planta de asfalto puede ser peligroso.
El funcionamiento de la maquinaria, las altas temperaturas, el ruido y los camiones de reparto y de transporte en movimiento aumentan la posibilidad de que se produzca un accidente. Los tipos de accidentes más comunes en una planta incluyen quemaduras de los trabajadores por la mezcla de asfalto caliente, salpicaduras de aglutinante asfáltico caliente, aplastamiento de una mano en una pieza de maquinaria o atropello por un vehículo en movimiento.

Trabajar cerca de una obra de pavimentación asfáltica también puede ser peligroso. Los accidentes más comunes para quienes trabajan cerca de la pavimentadora incluyen ser atropellados por el tráfico, el equipo de pavimentación, los camiones de transporte que retroceden o se alejan de la pavimentadora y el equipo de compactación. Las quemaduras por la mezcla caliente y el equipo también se encuentran entre las lesiones más comunes.

La seguridad es responsabilidad de todos en un proyecto de pavimentación asfáltica. Todas las personas que trabajan para el contratista, desde el supervisor hasta el operador de la pala cargadora en la planta de asfalto, pasando por el conductor del camión y el operador de la apisonadora, deben ser conscientes en todo momento de la necesidad de aplicar hábitos de trabajo seguros. Del mismo modo, todas las personas que trabajan como representantes de la agencia, desde el ingeniero del proyecto hasta el inspector en la obra de pavimentación, pasando por el técnico de pruebas que supervisa la operación de pavimentación, deben practicar hábitos de trabajo seguros. Todas las personas que participan en el proyecto deben conocer, comprender y cumplir las normas de la OSHA.

Una formación y una comunicación eficaces son fundamentales para garantizar un entorno de trabajo seguro. Todas las personas que participan en el proyecto deben saber qué se espera de ellas y cómo realizar las tareas asignadas. Es esencial que los operadores de equipos reciban una formación adecuada sobre el funcionamiento de los mismos. Es necesario realizar cursos de reciclaje a intervalos frecuente.

Las charlas sobre seguridad son una buena forma de comenzar el día tanto para el personal del contratista como para el de la agencia. Varias organizaciones diferentes publican presentaciones breves y concisas sobre seguridad que pueden completarse en 2 o 3 minutos. Es necesario recordar a las personas que están trabajando en un entorno potencialmente peligroso, tanto en la planta como en la operación de pavimentación, y las charlas diarias son una forma de satisfacer esta necesidad. Además, si se observa una práctica de trabajo insegura, se deben tomar medidas correctivas de inmediato, incluso si ello implica detener la operación de pavimentación hasta que se modifique la práctica insegura.

Las personas con más probabilidades de sufrir lesiones en un proyecto de pavimentación asfáltica son aquellas que son nuevas en este tipo de trabajo. Sin una formación adecuada antes de comenzar un proyecto de pavimentación, estas personas no comprenden plenamente la diferencia entre seguir prácticas de trabajo seguras y correr riesgos innecesarios. A veces, su entusiasmo por destacar en un nuevo trabajo y complacer a los demás puede eclipsar su conciencia sobre las prácticas de seguridad adecuadas.

Las lesiones innecesarias también las sufren quienes llevan muchos años trabajando en la planta y en las operaciones de pavimentación y, por lo tanto, pueden volverse demasiado cómodos y complacientes con los equipos y los procedimientos de seguridad. La seguridad debe ser tan importante en el día a día de estas personas como lo es para los nuevos en el trabajo.

Se necesita un cuidado y una vigilancia constantes para prevenir accidentes y lesiones relacionados con las operaciones con asfalto. La OSHA, la NAPA, el Instituto del Asfalto, los departamentos de transporte estatales (DOT) y otras organizaciones disponen de publicaciones y vídeos que tratan sobre la seguridad en el asfalto. Estas herramientas deben ponerse a disposición del personal pertinente y formar parte de la formación periódica en materia de seguridad

3. Materiales asfálticos y diseño de mezclas

3.1 INTRODUCCIÓN

Watch Videos:
Materials in a Job Mix Formula
Balanced Mix Design for Airfield Mixtures

Las mezclas asfálticas tienen tres ingredientes principales ingredientes: aglutinante, áridos y aire. El asfalto aglutinante, también llamado cemento asfáltico o betún, se obtiene del refinado del petróleo crudo. Los aglutinantes pueden clasificarse mediante varios métodos. Fuera de Estados Unidos y Canadá, el método más común es el sistema de clasificación por penetración. A principios de la década de 1960, el Instituto del Asfalto desarrolló el sistema de clasificación por viscosidad para utilizar una propiedad más fundamental del material en lugar del sistema empírico de clasificación por penetración. A finales de la década de 1990, Estados Unidos y Canadá adoptaron el sistema de clasificación por rendimiento (PG) desarrollado en el marco del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras. El último método de clasificación de ligantes utiliza la prueba y la especificación de recuperación por fluencia bajo múltiples tensiones (MSCR).

El agregado utilizado en las mezclas asfálticas suele ser una combinación de materiales gruesos y finos, con relleno mineral añadido según sea necesario. Los agregados disponibles localmente, procedentes de una cantera o una gravera, son los que se utilizan con mayor frecuencia para minimizar los costes de transporte.

El proceso de diseño de la mezcla determina la proporción correcta de ligante y agregado necesario para producir una mezcla asfáltica con las propiedades y características necesarias para soportar los efectos de la carga y el medio ambiente durante muchos años.

Las mezclas asfálticas requieren huecos de aire para permitir la expansión térmica del aglutinante sin sangrado ni lavado. La mayoría de los diseños de mezclas asfálticas son de granulometría densa y tienen como objetivo huecos de aire en el rango del 3 al 4 por ciento. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta se diseñan intencionalmente con altos huecos de aire (alrededor del 20 por ciento) para permitir que el agua fluya a través de la mezcla y se drene hacia los lados de la capa.

El diseño de la mezcla se realiza en el laboratorio, generalmente utilizando uno de dos métodos cuya principal diferencia es el método de compactación. Hasta finales de la década de 1990, el método de diseño de mezclas más común era el método Marshall, que utilizaban alrededor del 75 % de los departamentos de carreteras estatales, así como el Departamento de Defensa y la Administración Federal de Aviación. Ahora, casi todos los departamentos de transporte estatales utilizan el método Superpave para el diseño de mezclas. En este método, las muestras se compactan con un compactador giratorio Superpave y se someten a pruebas para determinar sus propiedades volumétricas. A menudo se realizan pruebas adicionales para evaluar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la humedad y su resistencia a la deformación permanente (formado de roderos)
y a diferentes tipos de agrietamiento.

El proceso de diseño de la mezcla determina la proporción correcta de ligante y árido necesaria para producir una mezcla asfáltica con las propiedades y características necesarias para soportar los efectos de la carga y el medio ambiente durante muchos años.

En un proyecto de pavimentación asfáltica, el diseño de la mezcla suele ser desarrollado por el contratista o por un laboratorio privado, aunque algunos

las agencias gubernamentales siguen diseñando sus propias mezclas. Independientemente de quién complete la fase de diseño de la mezcla en el laboratorio, el resultado del proceso de diseño de la mezcla es un JMF. El JMF es el punto de partida para que el contratista produzca la mezcla asfáltica para el proyecto. A partir del JMF, se establecen los objetivos para las características de calidad de aceptación. Estos objetivos se utilizan luego con tolerancias y una medida de calidad para la aceptación de los materiales asfálticos de aeropuertos o carreteras.

Este capítulo repasa brevemente las propiedades de los materiales utilizados para producir una mezcla asfáltica y el proceso de diseño de la mezcla. También se analizan algunas de las diferencias que pueden existir entre las mezclas producidas en laboratorio y en planta, y entre los valores JMF y los resultados de las pruebas en planta.

3.2 LIGANTE ASFÁLTICO: SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES

Los ligantes deben someterse a pruebas para garantizar que el producto recibido y utilizado cumple con las especificaciones. Las primeras pruebas de ligantes asfálticos eran inexistentes o rudimentarias. Al igual que la infame «prueba de masticación», solo buscaban distinguir entre ligantes más duros y más blandos. El inevitable progreso trajo consigo métodos de prueba más nuevos y sofisticados, lo que dio lugar a especificaciones de compra más completas que se relacionan directamente con las expectativas de rendimiento previstas del ligante (por ejemplo, rigidez y perfil de temperatura, ductilidad y fluidez) cuando se incorpora a la mezcla asfáltica.

El Instituto del Asfalto mantiene una database con las especificaciones de compra de emulsiones y ligantes de los Departamentos de Transporte de los estados de EE. UU. y las provincias canadienses.

3.2.1 Sistemas de clasificación por penetración

La penetración de un ligante asfáltico (AASHTO T 49, ASTM D946) es la penetración de una aguja ponderada en una muestra de ligante medida en unidades de decimilímetros (0,1 mm) a 25 °C (77°F). Las mezclas asfálticas con ligantes más rígidos (es decir, con una penetración menor) serán más rígida a una temperatura determinada que las mezclas con ligantes más blandos (es decir, con una penetración mayor). Por ejemplo, a una temperatura determinada, una mezcla que contenga un ligante clasificado con un grado de penetración de 60-70 será más rígida y puede requerir un mayor esfuerzo de compactación por parte de los rodillos para alcanzar la densidad deseada que una mezcla que contenga un ligante asfáltico con un grado de penetración de 120-150. Esta prueba empírica es un indicador de la rigidez a una temperatura determinada, pero cualquier relación con el rendimiento general de la mezcla puede variar significativamente.

3.2.2 Sistemas de clasificación por viscosidad

La clasificación de los ligantes asfálticos según su viscosidad (resistencia al flujo) se define mediante una medición de la viscosidad a 60 °C (140 °F) del material en su estado original (tal y como se recibe de la refinería) (denominado AC, por cemento asfáltico) o de un ligante considerado comparable al material después de haber pasado por las altas temperaturas del proceso de producción de la planta (denominado AR, por residuo envejecido). En el sistema de clasificación AC, una mezcla que contenga un AC-20

será más rígida que una mezcla que contenga un AC-10. Del mismo modo, en el sistema de clasificación AR, una mezcla que contenga un AR-4000 será más rígida que una que contenga un AR- 2000 a la misma temperatura. La norma de viscosidad ASTM es D3381, mientras que la norma de viscosidad AASHTO es M 226.

3.2.3 Sistema de clasificación por rendimiento Superpave

Los sistemas de clasificación basados en la penetración y la viscosidad han funcionado razonablemente bien durante muchos años y todavía se utilizan en muchos países debido a la simplicidad y portabilidad de los equipos de ensayo. Sin embargo, estos sistemas de clasificación más simples pueden categorizar los ligantes dentro del mismo grado, aunque puedan presentar características de temperatura y rendimiento muy diferentes en el entorno en el que se utilizan.

El sistema PG se desarrolló para proporcionar un conjunto mejorado de especificaciones para ligantes asfálticos (AASHTO M 320, ASTM D6373). Este sistema se esfuerza por medir las propiedades físicas que pueden relacionarse directamente con el rendimiento en el campo mediante principios de ingeniería. Las pruebas PG se realizan en tiempos de carga, temperaturas y condiciones de envejecimiento que representan de forma más realista los que se dan en los pavimentos en servicio. Las especificaciones PG ayudan a seleccionar un grado de ligante que limite la contribución del ligante al agrietamiento a baja temperatura, la deformación permanente (surcos) y el agrietamiento por fatiga del pavimento asfáltico dentro del rango de clima y carga de tráfico que se da en el lugar del proyecto.

Una diferencia importante entre las especificaciones PG y las basadas en la penetración o la viscosidad es el formato general de los requisitos. Para los ligantes PG, los criterios de rendimiento permanecen constantes; sin embargo, las temperaturas a las que deben alcanzarse esas propiedades varían en función del clima en el que se espera que el ligante preste servicio. El ligante se clasifica en incrementos de 6 °C de temperatura del pavimento. Un ejemplo de un La designación del ligante en este sistema es PG 64-22. Para este ejemplo, el ligante se selecciona para resistir condiciones ambientales en las que la temperatura máxima promedio del pavimento durante 7 días es de al menos 64 °C (147 °F), pero inferior a 70 °C (158 °F). En cuanto a las bajas temperaturas, el ligante se selecciona para que funcione en temperaturas del pavimento de −22 °C (−8 °F) hasta justo por encima del siguiente grado, a −28 °C (−18 °F).

Las especificaciones PG ayudan a seleccionar un grado de ligante que limite la contribución del ligante al agrietamiento a baja temperatura, la deformación permanente (surcos) y el agrietamiento por fatiga del pavimento asfáltico dentro del rango de clima y carga de tráfico que se encuentra en el lugar del proyecto.

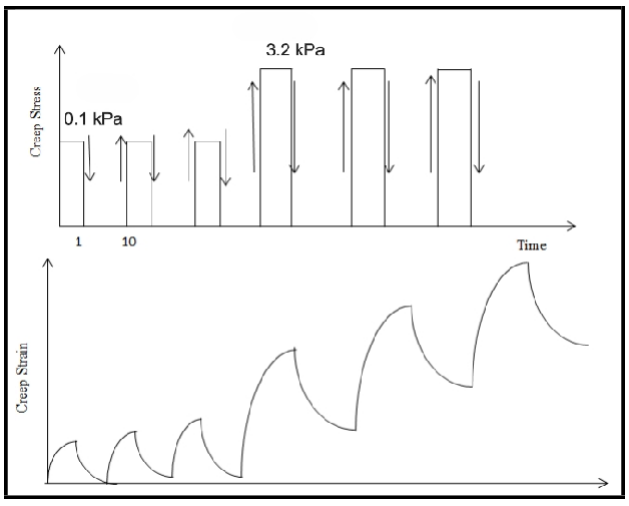
Aunque este concepto funcionaba bien para pavimentos y aeródromos convencionales con velocidad moderada y volumen de tráfico moderado, las investigaciones indicaron que era necesario perfeccionarlo para pavimentos con cargas lentas y cargas más pesadas. En lugar de cambiar los criterios y/o las condiciones de ensayo para reflejar un cambio en el tiempo de carga y el volumen de tráfico, los arquitectos del sistema PG

optaron por ajustar simplemente la velocidad y el volumen del tráfico mediante «grados de inclinación», utilizando grados más rígidos que los indicados por el clima únicamente. Se trataba de una forma sencilla de garantizar un soporte adecuado en condiciones de alto volumen y/o carga lenta. Los requisitos para el grado de irregularidad se pueden encontrar en la norma actual AASHTO M 323 para carreteras, y para aeródromos, los requisitos se pueden encontrar en las especificaciones DoD UFGS 32 12 15.13 y FAA P-401/P-403.

3.2.4 Sistema de clasificación de recuperación de fluencia bajo múltiples tensiones

La especificación MSCR (AASHTO M 332, ASTM D7405) pretende resolver los problemas del sistema Superpave PG, mejorando la forma en que se aborda el comportamiento a altas temperaturas de los asfaltos modificados con polímeros y eliminando la necesidad de clasificar los baches. Utiliza el concepto de ensayo de fluencia y recuperación para evaluar el potencial de deformación permanente del ligante asfáltico. Utilizando el reómetro de cizallamiento dinámico, se aplica una carga de fluencia de 1-s a la muestra de ligante asfáltico en película fina envejecida en horno. Una vez retirada la carga de 1-s, se deja que la muestra se recupere durante 9 segundos. La prueba comienza con la aplicación de una tensión baja (0,1 kPa) durante 10 ciclos de fluencia/recuperación, y luego la tensión se aumenta a 3,2 kPa y se repite durante 10 ciclos adicionales.

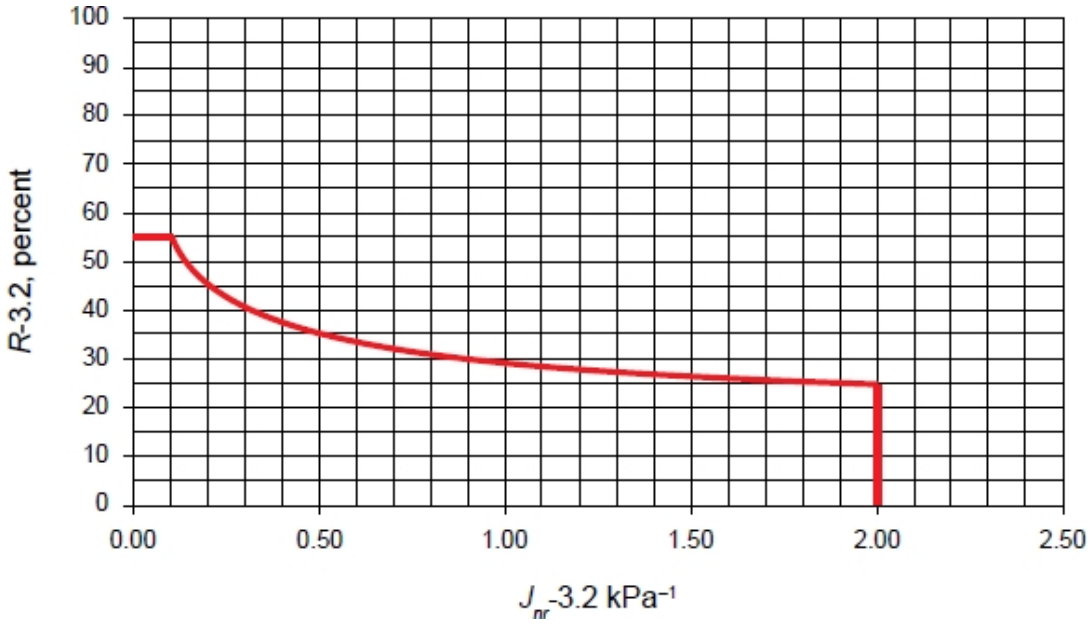
En la prueba MSCR, se pueden determinar dos parámetros distintos durante cada ciclo de carga: la complacencia de fluencia no recuperable (J_{nr}) y el porcentaje de recuperación (recuperación MSCR). La figura 4 muestra un resultado típico de la prueba MSCR. Las muestras de ensayo se someten a una carga de fluencia de
0,1 kPa y 3,2 kPa. Después de cada carga de fluencia de 1 s, se deja que el aglutinante se recupere durante 9 s. Jnr es una medida de la deformación residual que queda en la muestra después de repetidas cargas de fluencia y recuperación, en relación con la cantidad de tensión aplicada. Se ha demostrado que este parámetro se correlaciona mejor con el potencial de formación de roderas que el parámetro G*/sin δ utilizado en el sistema Superpave.



Fuente: Departamento de Transporte de los Estados Unidos

Figura 4. Respuestas de tensión y deformación MSCR

La figura 5 muestra los criterios de aceptación de la norma AASHTO R 92 para la recuperación MSCR. Una vez calculada la cantidad media de recuperación, los resultados se combinan con J_{nr} para indicar si un aglutinante tiene un componente elástico significativo.



Fuente: AASHTO (AASHTO R S2, figura 1)

Figura 5. Curva de aceptación de recuperación MSCR

A diferencia del sistema AASHTO M320, la temperatura de ensayo utilizada para el ensayo MSCR se selecciona en función de las temperaturas elevadas reales del pavimento sin cambios de pendiente. Por ejemplo, si un ligante tuviera que funcionar en un entorno con temperaturas medias elevadas del pavimento de 64 °C y temperaturas bajas del pavimento que alcanzan los −22 °C, la prueba MSCR se realizaría con el ligante a una temperatura elevada de 64 °C, independientemente de la velocidad del tráfico y la carga. La mayor carga se tiene en cuenta aumentando la rigidez (reduciendo la flexibilidad) requerida para el ligante asfáltico a la temperatura del ligante.

Las designaciones que figuran en la tabla 1 se basan en la información que se encuentra en AASHTO M 332.

Tabla 1. Designaciones MSCR

Designación MSCR	Situación del tráfico
«S» (Estándar)	Menos de 10 millones de cargas equivalentes por eje (ESAL) y velocidades de tráfico >70 km/h
«H» (pesado)	De 10 a 30 millones de ESAL o tráfico lento de 20 a 70 km/h
«V» (muy pesado)	>30 millones de ESAL o tráfico parado de <20 km/h
«E» (extremadamente pesado)	>30 millones de ESAL y tráfico estacionario de <20 km/h

km/h = kilómetros por hora Fuente: AASHTO

Nota: El aumento del grado se logra utilizando las designaciones «H», «V» o «E» y no aumentando el grado PG a alta temperatura, tal y como se recomienda en la norma AASHTO M 320.

Para cargas de tráfico estándar, Jnr (determinado a un esfuerzo cortante de 3.2 kPa) debe tener un valor máximo de 4.5 kPa^{-1}. Continuando con el ejemplo, el grado resultante sería PG 64S-22. A medida que el tráfico aumenta a cargas pesadas y muy pesadas, el Jnr del ligante asfáltico debe ser menor—permitiendo valores máximos de 2.0 y 1.0 kPa^{-1}, lo que da como resultado los grados PG 64H-22 y PG 64V-22. Para cargas de tráfico extremadamente pesadas, el Jnr del ligante asfáltico solo podría tener un cumplimiento de fluencia no recuperable máximo de 0.5 kPa^{-1}, resultando en un PG 64E-22.

A diferencia del sistema AASHTO M320, la temperatura de ensayo utilizada para la prueba MSCR se selecciona en función de las temperaturas reales altas del pavimento, sin aplicar ajuste de grado.

Aunque el sistema de clasificación MSCR está especificado por muchos Departamentos de Transporte estatales (DOT), al momento de redactar este documento no está especificado para aeródromos, ni en DoD UFGS 32 12 15.13 ni en las especificaciones FAA P-401/P-403.

3.2.5 Características Temperatura – Viscosidad

La viscosidad de un ligante asfáltico cambia con la temperatura: a temperaturas más bajas, la viscosidad es mayor (mayor "rigidez"). Esta relación temperatura–viscosidad afecta varios aspectos de los ensayos de asfalto, así como de la producción, colocación y compactación de mezclas asfálticas.

Durante los ensayos de laboratorio, tanto del ligante como de las mezclas asfálticas, la temperatura de ensayo siempre está especificada y debe controlarse estrictamente. Sin este control, los resultados pierden significado. Por ejemplo, la temperatura de ensayo para la prueba Hamburg de formación de huellas podría ser 50 ± 1 °C para una agencia en particular. Si la temperatura real es menor, el ligante será más rígido y los resultados mostrarán un ahuellamiento artificialmente bajo. Si la temperatura supera la especificada, los resultados indicarían falsamente que la mezcla es más susceptible al ahuellamiento de lo que realmente es.

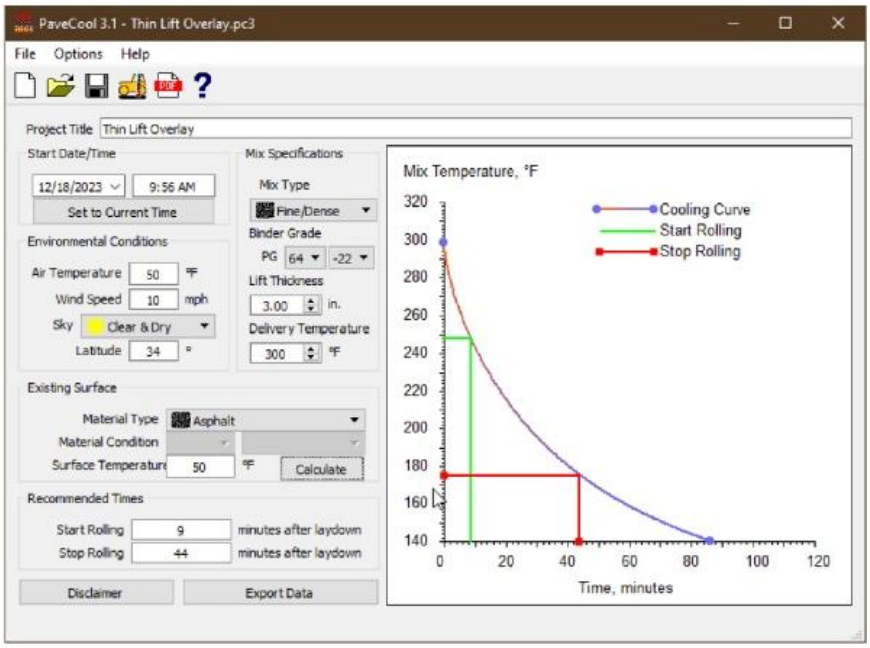
Durante la producción, la viscosidad del ligante debe ser lo suficientemente baja para que pueda ser bombeado y manipulado en la planta. Tanto las especificaciones PG como las MSCR requieren que la viscosidad del ligante sea menor a 3 Pa·s a 135 °C.

Durante la colocación de la mezcla, la viscosidad tiene una gran influencia en la trabajabilidad de la mezcla. El trabajo manual—cuando un operario está colocando la mezcla con una pala o un rastrillo para asfalto —se vuelve cada vez más difícil a medida que aumenta la viscosidad del ligante. La mezcla fluye más fácilmente a través de la pavimentadora cuando la viscosidad del ligante es menor.

La viscosidad de un ligante asfáltico cambia con la temperatura; a temperaturas más bajas, la viscosidad aumenta (mayor "rigidez"). Esta relación entre temperatura y viscosidad influye en varios aspectos de los ensayos del asfalto, así como en su producción, colocación y compactación.

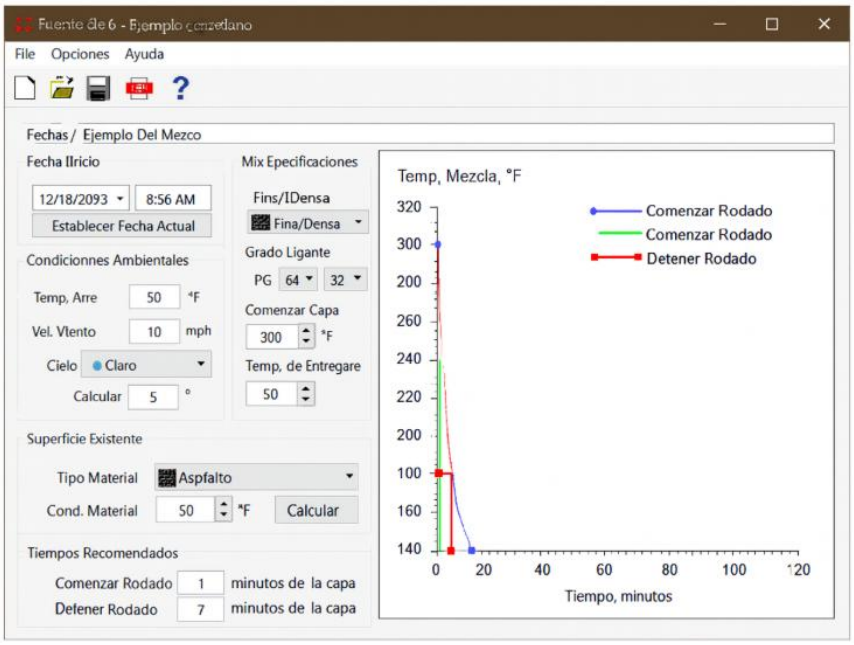
Durante la compactación, el tiempo total disponible para lograr una densidad adecuada en la capa está influenciado por la viscosidad del ligante. A medida que el ligante se vuelve más rígido o viscoso conforme la mezcla se enfría, se requiere un mayor esfuerzo de compactación para alcanzar una densidad determinada. La viscosidad del ligante no solo depende de las propiedades inherentes del material, sino también del espesor de la capa compactada y de las condiciones ambientales durante la construcción. Las capas más delgadas se enfriarán más rápido, afectando significativamente el tiempo permitido para la compactación. Un clima más frío y con viento puede reducir drásticamente el tiempo disponible para lograr una compactación adecuada o incluso hacerla imposible.

PaveCool y MultiCool son aplicaciones de dominio público que estiman el tiempo disponible para las operaciones de compactación basándose en una variedad de variables ingresadas por el usuario. La Figura 6 y la Figura 7 muestran el efecto de disminuir el espesor de la capa sobre el tiempo disponible para compactación, manteniendo constantes todas las demás variables. La Figura 6 estima 44 minutos disponibles para compactar una capa de 3 pulgadas (76 mm) dadas varias constantes, incluyendo temperaturas del aire y de la superficie existente de 50 °F (10 °C), y una mezcla fina/de gradación densa con un ligante PG 64-22.
La Figura 7 muestra que, usando las mismas variables para una capa de 1 pulgada (25 mm), el tiempo disponible para la compactación disminuye a 7 minutos.



Fuente: Minnesota DOT

Figura 6. Ejemplo del tiempo disponible para compactación en una capa de 3 pulgada



Fuente: Minnesota DOT

Figura 7. Ejemplo del tiempo disponible para compactación en una capa de 1 pulgada

La tasa de cambio de la viscosidad con respecto al cambio en la temperatura de un ligante se conoce como susceptibilidad térmica del ligante. Un material que es altamente susceptible a la temperatura es aquel que presenta un gran cambio en viscosidad ante un pequeño cambio de temperatura. Varios ligantes que tengan la misma penetración a 25 °C (77 °F) no necesariamente presentarán la misma viscosidad a 135 °C (275 °F), ya que sus características de susceptibilidad térmica pueden variar. En el laboratorio, reportar esta relación entre temperatura y viscosidad es obligatorio para algunos procedimientos de diseño de mezclas, ya que las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio suelen basarse en un nivel específico de viscosidad.

La tasa de cambio en la viscosidad debido a un cambio en la temperatura de un ligante se conoce como la susceptibilidad térmica del ligante.

3.2.6 Modificación con Polímeros

Los asfaltos modificados con polímeros (PMA) actúan para aplanar la relación temperatura–viscosidad, haciendo que los ligantes sean menos susceptibles a los cambios de temperatura. Una forma de clasificar los polímeros es según sus propiedades físicas. Dependiendo de su comportamiento cuando se estiran bajo una fuerza suficiente, los polímeros se clasifican como plastómeros (plásticos) o elastómeros (elásticos). Cuando se estiran, los plastómeros se deforman y permanecen en la posición estirada cuando se retira la carga.
Los elastómeros, en cambio, se deforman bajo carga (se estiran), pero regresan a su forma original cuando la carga es liberada a su su forma original cuando se libera la carga.

La mayoría de las poliolefinas se comportan como plastómeros, mientras que los copolímeros de estireno-butadieno se comportan como elastómeros

Cuando se mezclan con asfalto, los polímeros tienden a comportarse de dos maneras distintas. Si el polímero forma partículas discretas dentro del ligante asfáltico, entonces actúa principalmente como espesante o relleno. Esto aumenta la viscosidad del ligante asfáltico sin producir efectos significativos en las propiedades a bajas temperaturas. Si el polímero forma una red continua dentro del ligante asfáltico, actúa como una mezcla homogénea. Esta mezcla puede conferir algunas de las propiedades físicas del polímero al ligante, lo que puede afectar tanto las propiedades a altas como a bajas temperaturas del asfalto.

La tarea del diseñador consiste en determinar si el costo adicional de utilizar mezclas asfálticas modificadas con polímeros (PMA) vale la pena en función del desempeño adicional esperado. Por ejemplo, usar una mezcla PMA en un sendero peatonal dentro de un parque podría ser un gasto innecesario. En cambio, el uso de una mezcla PMA en una calle o pista de alta circulación, como una vía de taxis o un camino de gran volumen, puede ser una inversión mucho más adecuada.

3.3 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS

Los agregados poseen numerosas características que influyen en el desempeño de la mezcla asfáltica. Estas características no solo afectan la cantidad de ligante necesaria para lograr un rendimiento satisfactorio, sino que también influyen en la constructibilidad de la mezcla y en su durabilidad. Seleccionar materiales que cumplan con ciertas características de calidad es un primer paso importante en el proceso de diseño de mezclas. Las características de los agregados que se analizan en esta sección incluyen la distribución de tamaño de partículas (gradación), gravedad específica, textura y forma superficial, absorción, contenido de arcilla, resistencia al desgaste, durabilidad y materiales perjudiciales.

El proceso de diseño de mezclas Superpave considera cuatro características particularmente importantes: la angularidad del agregado grueso, la angularidad del agregado fino, el contenido de arcilla (equivalente de arena) y las partículas planas y alargadas. Estas se denominan “propiedades de consenso”, y sus criterios están establecidos en la norma AASHTO M 323 (ver Tabla 2). Otros criterios importantes de los agregados se denominan “propiedades de la fuente”, y son especificados por la agencia usuaria con base en la experiencia local con los materiales y en su disponibilidad. Aunque todas estas propiedades tienen requisitos en las especificaciones de la FAA y del DoD, las especificaciones para aeródromos no utilizan los términos “propiedades de consenso” y “propiedades de la fuente”.

Seleccionar materiales que cumplan con ciertas características de calidad es un paso inicial importante en el proceso de diseño de mezclas.

Tabla 2. Requisitos de Propiedades de Consenso de los Agregados según AASHTO M 323

ESALs[a] de diseño (millones)	Caras fracturadas, agregado grueso[b], % mínimo		Contenido de vacíos no compactados del agregado fino, % mínimo		Equivalente de arena, % mínimo	Partículas planas y alargadas[b], % máximo
	Profundidad desde la superficie		Profundidad desde la superficie			
	≤ 100mm	>100 mm	≤ 100mm	>100 mm		
<0.3	55/-	-/-	-[d]	-	40	-
0.3 a <3	75/-	50/-	40	40	40	10
3 a <10	85/80	60/-	45	40	45	10
10 a <30	95/90	80/75	45	40	45	10
≥30	100/100	100/100	45	40	50	10

a El nivel de tráfico previsto en el proyecto sobre el carril de diseño durante un período de 20 años. Independientemente de la vida útil real de la vía, determine los ESAL de diseño para un período de 20 años.
b Este criterio no se aplica a mezclas con tamaño máximo nominal de 4,75 mm.
c 85/80 indica que el 85 % del agregado grueso tiene al menos una cara fracturada y el 80 % tiene dos o más caras fracturadas.
d Para mezclas con tamaño máximo nominal de 4,75 mm diseñadas para niveles de tráfico inferiores a 0,3 millones de ESAL, el contenido mínimo de vacíos no compactados es del 40 %.
e Para mezclas con tamaño máximo nominal de 4,75 mm diseñadas para niveles de tráfico iguales o superiores a 0,3 millones de ESAL, el contenido mínimo de vacíos no compactados es del 45 %.

Nota: Si menos del 25 % de una capa de construcción se encuentra a menos de 100 mm de la superficie, la capa puede considerarse por debajo de los 100 mm para efectos del diseño de la mezcla.

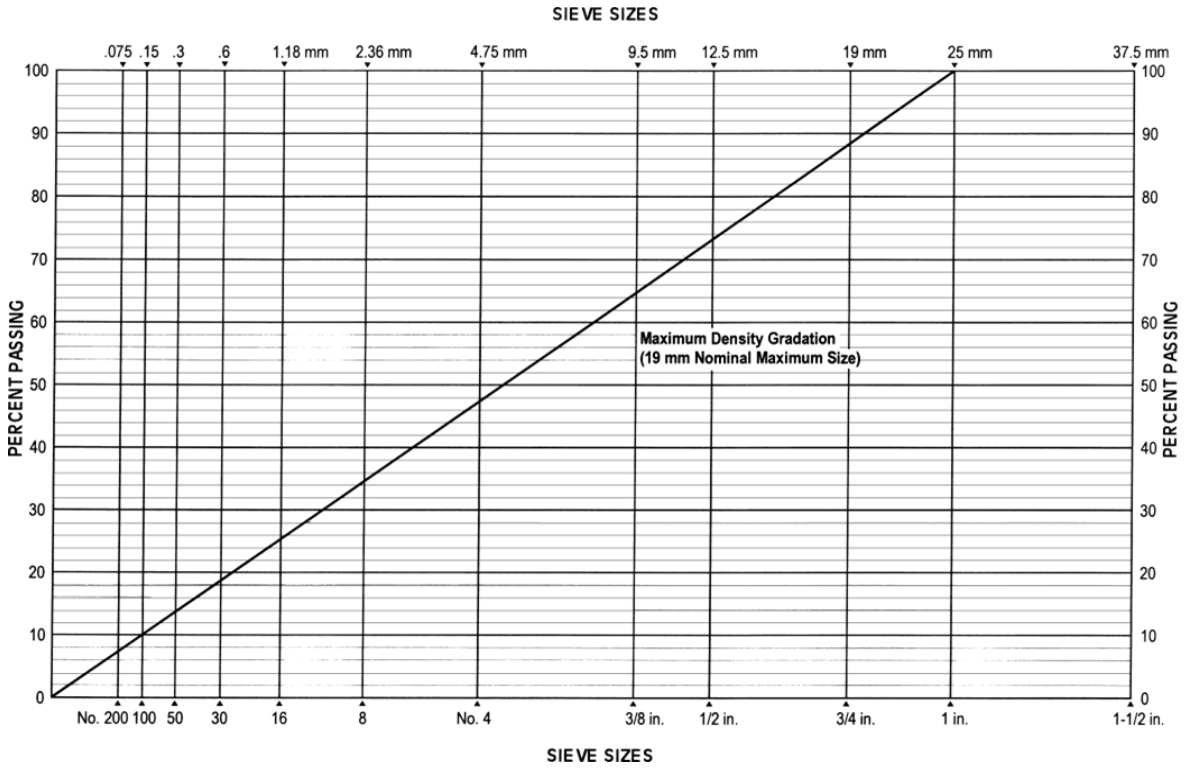
3.3.1 Distribución del Tamaño de las Partículas

Una de las propiedades importantes de los agregados para su uso en pavimentos es la distribución del tamaño de las partículas, o gradación. Los métodos de prueba de gradación se especifican como secos (ASTM C136/AASHTO T 27) o lavados (ASTM C117/AASHTO T 11). Para los diseños de mezclas asfálticas, el agregado siempre debe ser lavado para evaluar correctamente el porcentaje de partículas finas.

Las gradaciones de agregados con diferentes tamaños máximos de partículas producirán mezclas asfálticas con características distintas. Desafortunadamente, diferentes especificaciones pueden tener definiciones ligeramente distintas para el tamaño máximo de partícula. El método Superpave utiliza las siguientes definiciones de tamaño de agregado:

- Tamaño máximo de agregado: un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal.
- Tamaño máximo nominal de agregado (NMAS): un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 % en peso.

La gradación se controla generalmente mediante especificaciones que definen la distribución de los tamaños de partículas. La norma AASHTO M 323 establece los puntos de control de gradación de agregados Superpave basados en el NMAS. Los requisitos de gradación de mezclas asfálticas para aeródromos se muestran en el P-401 de la FAA y en el UFGS 32 12 15.13 del DoD. Estos se agrupan de más grueso a más fino como Gradación 1, Gradación 2 y Gradación 3. El gráfico de gradación en la Figura 8 representa una manera visual de mostrar las gradaciones de los agregados: el gráfico de potencia 0,45. La abscisa corresponde al tamaño de partícula trazado en una escala de potencia 0,45, mientras que la ordenada usualmente representa el porcentaje en peso que pasa por un tamiz dado en una escala aritmética.



Fuente: Instituto del Asfalto.

Figura 8. Gráfico de gradación, escala exponencial (0.45)

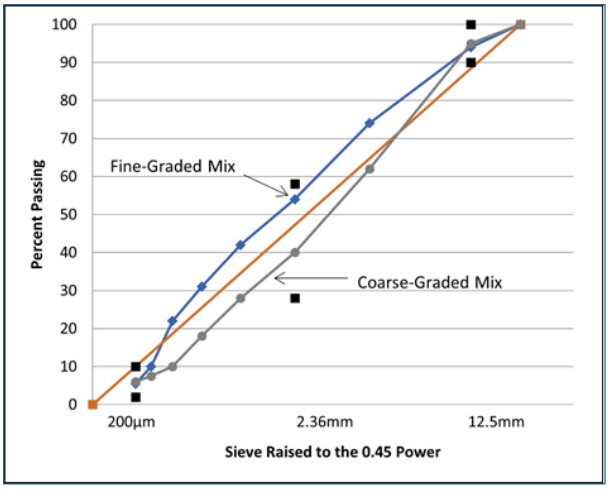
En este gráfico, la gradación de máxima densidad (es decir, el empaquetamiento de partículas más compacto posible) corresponde a una línea recta trazada desde el origen hasta el tamaño máximo de partícula seleccionado. Esta línea en el gráfico de potencia 0,45 se conoce como MDL (Línea de Máxima Densidad). La MDL mostrada en la Figura 8 representa la gradación de máxima densidad para un agregado con un tamaño máximo de 1.0 pulgada (25.0 mm). Debe tenerse en cuenta que la MDL es aproximado, pero puede servir como una referencia útil para la proporción de los agregados. La gradación real en la que ocurre la máxima densidad, para un agregado particular en una mezcla asfáltica compactada, está fuertemente influenciada por la forma, resistencia y textura superficial de los agregados, y puede no coincidir exactamente con la MDL

La distribución del tamaño de partículas delimita el tipo general de estructura del agregado en la mezcla asfáltica de dos maneras. Primero, el tipo general de mezcla (gradación densa, gradación abierta o gradación discontinua) se define por la gradación. Segundo, la gradación también indica el NMAS de la mezcla. El NMAS de la mezcla a usar generalmente está relacionado con su ubicación en la estructura del pavimento.

El tipo de mezcla asfáltica más común con diferencia es la mezcla de gradación densa. Estas mezclas tienen una gradación de agregados distribuida de manera bastante uniforme a lo largo de todo el rango de tamaños utilizados. Pueden emplearse en construcción nueva y en recubrimientos; en capas de base, intermedias y de superficie; y en carreteras y aeródromos. Pueden ser de gradación gruesa o gradación fina, como se muestra en la Figura 9. Las mezclas de gradación fina generalmente tienen gradaciones que se ubican por encima de la MDL, mientras que las mezclas de gradación gruesa suelen tener gradaciones que se ubican por debajo de la MDL. Las mezclas para aeródromos son típicamente de gradación fina.

El tipo de mezcla asfáltica más común con diferencia es la mezcla de gradación densa. Estas mezclas tienen una gradación de agregados distribuida de manera bastante uniforme a lo largo de todo el rango de tamaños utilizados.

El NMAS (Tamaño Máximo Nominal de Agregado) para mezclas de superficie es generalmente de 3/8 de pulgada (9,5 mm) o 1/2 pulgada (12,5 mm), pero puede ser tan fino como el No. 4 (4,75 mm) o tan grueso como 3/4 de pulgada (19,0 mm). La elección del NMAS a menudo se basa en la textura superficial deseada, ya que un agregado de tamaño máximo más fino produce una superficie más lisa y compacta. Las capas intermedias generalmente usan partículas de agregado más grandes que las mezclas de superficie, mientras que las mezclas de base suelen usar NMAS de 3/4 de pulgada (19,0 mm) o mayores. Las mezclas de gradación densa deben tener un espesor de capa de al menos cuatro veces el NMAS cuando se compactan. Para mezclas de gradación fina, los espesores de capa deben ser al menos tres veces el NMAS.



Fuente: Instituto del Asfalto

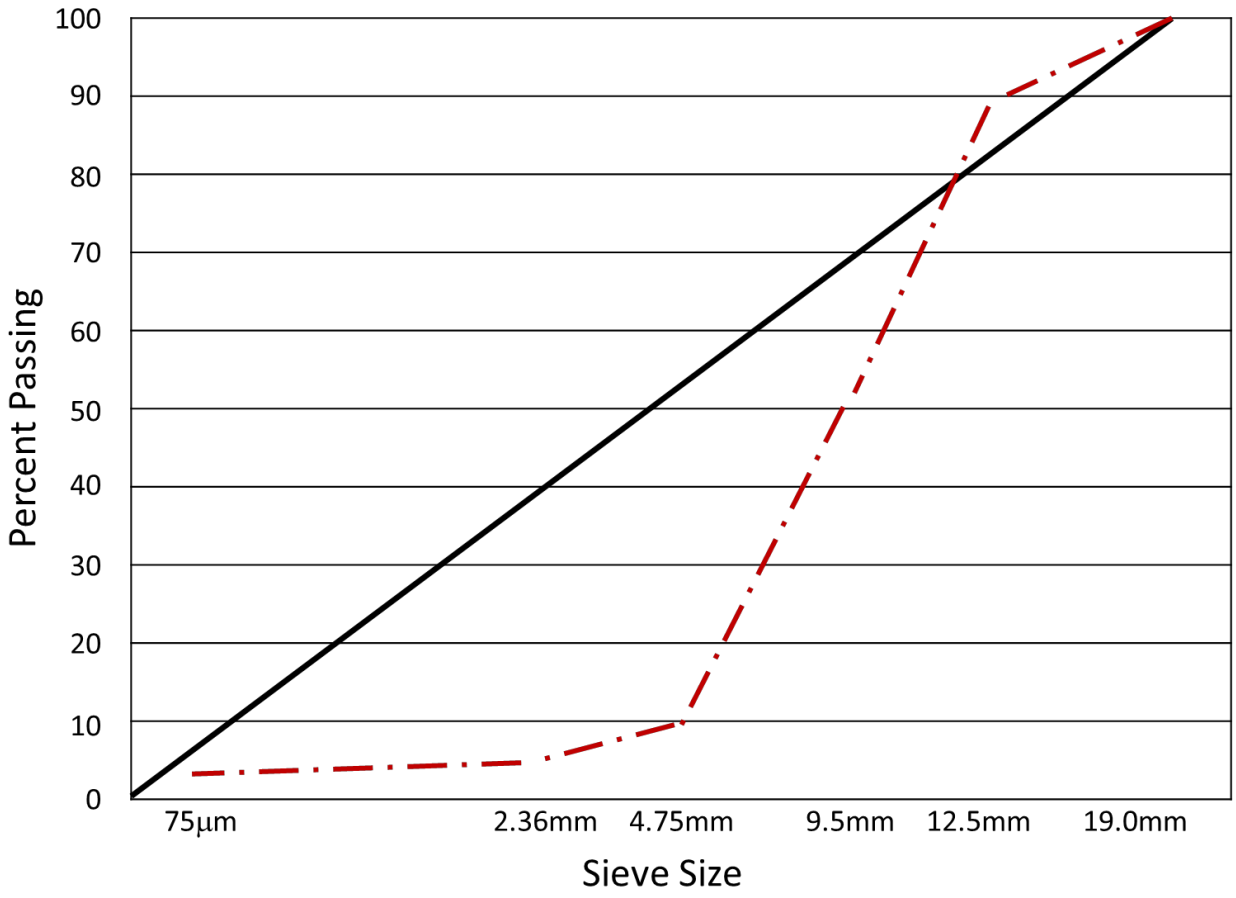
Figura 9. Mezclas de gradación densa representadas en un gráfico de potencia 0,45

Otro tipo básico de mezcla asfáltica es la mezcla de gradación abierta, representada en un gráfico de potencia 0,45 en la Figura 10. Estas mezclas se utilizan principalmente como capa superficial y están diseñadas principalmente por motivos de seguridad. Su estructura de agregado abierta se crea mediante la predominancia de partículas de agregado de tamaño uniforme, lo que genera vacíos de aire alrededor del 18 al 20 %. Las mezclas de gradación abierta permiten que el agua de lluvia fluya a través de la mezcla superficial y luego se desplace lateralmente sobre la capa inferior hacia el sistema de drenaje. Este diseño reduce considerablemente el riesgo de hidroplaneo, disminuye las salpicaduras y el rocío de los neumáticos, reduce el deslumbramiento en la vía y atenúa el ruido del pavimento. Estas mezclas no son buenas candidatas para pavimentación de aeródromos debido al mayor riesgo de generar FOD (escombros o cuerpos extraños). Las mezclas superficiales de gradación abierta suelen tener un NMAS de 3/8 a 1/2 pulgada (9,5 a 12,5 mm) y se especifican con espesores de capa de dos a tres veces el NMAS. La guía de NMAS frente al espesor de capa para mezclas de gradación densa no se aplica a las mezclas de gradación abierta, porque estas mezclas solo están unidas y asentadas de forma segura sobre la capa inferior para preservar el espacio de vacíos de aire. La sobrecompactación de estas mezclas contradiría su propósito de drenaje libre. Aunque el tráfico ayuda a evitar que la mezcla se obstruya, su permeabilidad disminuirá gradualmente con el tiempo. Las superficies de gradación abierta generalmente tienen una vida útil más corta que las mezclas de gradación densa.

Las mezclas de gradación abierta también pueden utilizarse como bases de gradación abierta o como parte de un pavimento permeable. El concepto de usar una base de gradación abierta (o base tratada con asfalto permeable, ATPB) junto con un sistema de drenaje perimetral para eliminar la humedad de la estructura del pavimento existe desde hace décadas. Al usar una base de gradación abierta, se debe colocar una tela filtrante sobre la subrasante o la base existente para evitar que las partículas finas migren hacia arriba y obstruyan los vacíos de aire en la capa asfáltica de gradación abierta. El sistema de drenaje perimetral debe ser monitoreado para prevenir aplastamiento durante la construcción y obstrucciones debido a nidos de roedores o crecimiento de vegetación; de lo contrario, el pavimento retendrá agua en lugar de drenarla. Estas dificultades de mantenimiento han resultado en que se diseñen menos sistemas de bases de gradación abierta.

El concepto detrás de los pavimentos porosos también puede aplicarse a estacionamientos y calles residenciales de bajo volumen para la gestión de aguas pluviales. El diseño típico de este sistema consiste en una mezcla superficial de gradación abierta que permite el drenaje a través del pavimento hacia un depósito de piedra subyacente. Normalmente se coloca una tela geotextil sobre la subrasante no compactada para mitigar la migración de finos hacia la cama de piedra.

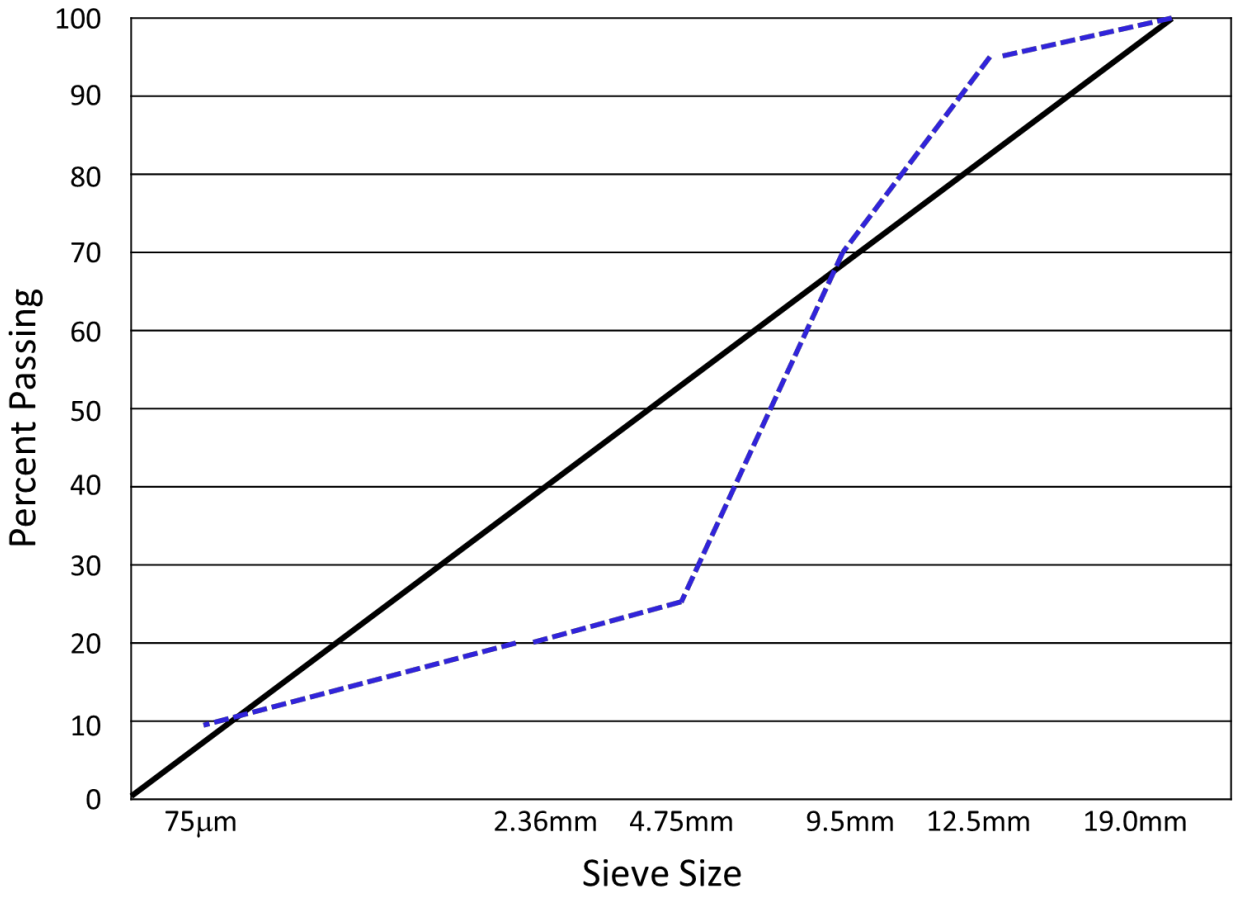
Estos sistemas de gestión de aguas pluviales en pavimentos porosos están diseñados para permitir una penetración rápida de la precipitación a través de la superficie del pavimento y una infiltración lenta a través del suelo sobre el cual se construye el depósito de piedra. Se consideran amigables con el medio ambiente debido a la reducción del escurrimiento y a superficies potencialmente más frescas. La pérdida de funcionalidad por obstrucción sigue siendo una preocupación. Sin embargo, la superficie porosa puede ser fresada y reemplazada para renovar su funcionalidad.



Fuente: Instituto del Asfalto.

Figura 10. Mezcla de gradación abierta representada en una gráfica de potencia 0,45

Las mezclas de gradación discontinua presentan altos porcentajes de partículas gruesas y finas, pero pocas partículas de tamaño intermedio, lo cual se refleja en la Figura 11. El contenido objetivo de vacíos de aire es típicamente del 4 %. La SMA (Mezcla Asfáltica de Matriz de Piedra) es el ejemplo más común de una mezcla asfáltica de gradación discontinua. Es una mezcla de alto desempeño (alta calidad), con alta resistencia al ahuellamiento debido al entramado del agregado grueso, y alta durabilidad gracias al mástique formado por el alto contenido de ligante (generalmente modificado con polímeros) y el relleno mineral. Debido al mayor contenido de ligante y a las fibras, que a menudo se utilizan para evitar el drenaje del ligante desde la estructura del agregado, las mezclas SMA suelen ser más costosas que las mezclas de gradación densa. Estas se utilizan casi exclusivamente como mezclas de capa de rodadura. El tamaño máximo nominal del agregado (NMAS) es típicamente de 3/8 a 1/2 pulgada (9.5 a 12.5 mm), aunque algunas entidades especifican tamaños de partícula diferentes. Al momento de la redacción de este documento, las mezclas SMA se utilizan exclusivamente en carreteras.



Fuente: Instituto del Asfalto.

Figura 11. Mezcla de gradación discontinua representada en una gráfica de potencia 0,45

3.3.2 Gravedad Específica

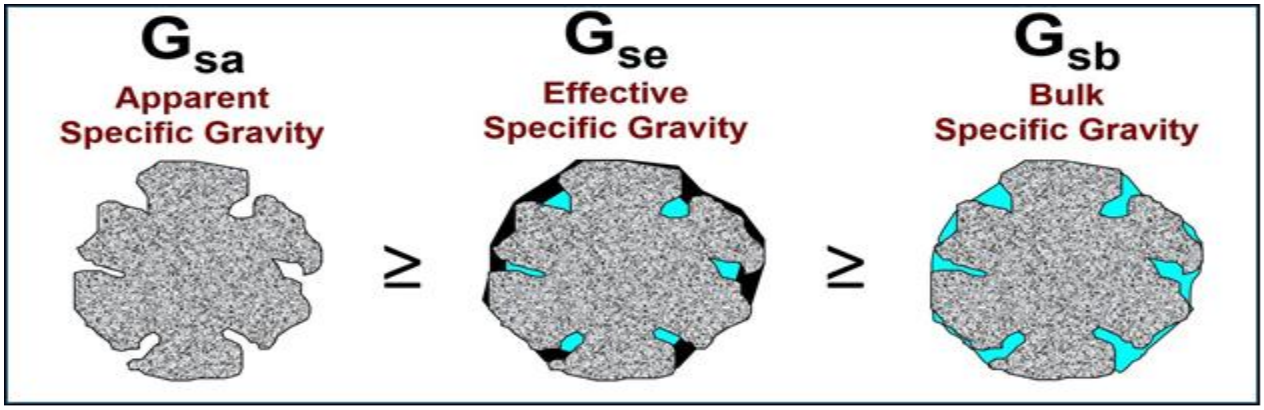
La gravedad específica del agregado es una propiedad importante que se utiliza para definir la densidad relativa de diferentes agregados. La relación entre la densidad (masa por unidad de volumen) de cada fuente de agregado y la densidad del agua a 73.4 °F (23 °C) es la propiedad adimensional denominada "gravedad específica". Una forma sencilla de interpretar esta propiedad es: "el número de veces que un material pesa más que un volumen equivalente de agua". Los métodos AASHTO T 84 (ASTM C128) y AASHTO T 85 (ASTM C127) se utilizan para determinar la gravedad específica del agregado fino y del agregado grueso, respectivamente. En la industria del asfalto, esta propiedad se expresa con tres cifras decimales (al 0.001 más cercano). Estos mismos ensayos también se emplean para determinar la absorción del agregado (al 0.1 más cercano).

A continuación, se presentan las gravedades específicas de agregados más comúnmente utilizadas:

- Gravedad específica aparente (G_{sa}).
- Gravedad específica aparente seca (G_{sb}).
- Gravedad específica efectiva (G_{se}).

La relación entre la densidad (masa por unidad de volumen) de cada fuente de agregado y la densidad del agua a 73.4 °F (23 °C) es la propiedad adimensional denominada "gravedad específica". Una manera sencilla de entender esta propiedad es: "el número de veces que un material pesa más que un volumen equivalente de agua".

Cada tipo de gravedad específica del agregado utilizada en la industria del asfalto emplea la masa seca del agregado. Como se muestra en la Figura 12, los volúmenes del agregado utilizados para calcular las gravedades específicas más comunes son diferentes. El volumen utilizado para calcular la gravedad específica aparente (G_{sa}) es el más pequeño, y corresponde únicamente al volumen de la partícula sólida del agregado. El volumen utilizado para calcular la gravedad específica aparente o a granel (G_{sb}) es el más grande, e incluye el volumen de la partícula del agregado más el volumen de los vacíos permeables al agua dentro de la partícula. El volumen utilizado para calcular la gravedad específica efectiva (G_{se}) se encuentra entre ambos, y corresponde al volumen de la partícula del agregado más el volumen de los vacíos permeables al agua, menos los vacíos permeables al asfalto. Por lo tanto, la G_{sa} siempre es mayor que la G_{se}, y la G_{se} siempre es mayor que la G_{sb}.



Fuente: Instituto del Asfalto.

Figura 12. Gravedades específicas de los agregados

3.3.3 Textura Superficial y Forma

La textura superficial del agregado es un factor importante que contribuye a su resistencia por fricción. Esta característica también influye de manera significativa en la resistencia de la mezcla al ahuellamiento. Cuanto más rugosa es la textura del agregado, mayor será la resistencia al ahuellamiento de la mezcla. La microtextura de los agregados finos y gruesos tiene un efecto importante sobre la resistencia al deslizamiento de los pavimentos asfálticos. La microtextura y la macrotextura del pavimento, la geología del material para resistir la erosión causada por la lluvia ácida, y la resistencia al pulimento del agregado contribuyen a la resistencia al deslizamiento y, por lo tanto, constituyen consideraciones importantes de seguridad.

La mayoría de las especificaciones de las entidades exigen que en la capa de rodadura se utilicen agregados que presenten una o más de estas características.

La forma del agregado también influye en la resistencia al ahuellamiento de una mezcla, siendo los agregados angulares los que producen mayor resistencia que los materiales más redondeados. Al igual que con la textura superficial, mientras más angular sea el agregado, mayor será el esfuerzo de compactación necesario para obtener una mezcla con un grado de densidad específico. Sin embargo, cuando se compacta adecuadamente, el pavimento resultante será más resistente al ahuellamiento.

Tres de las cuatro propiedades de consenso de Superpave están relacionadas con la forma de las partículas: el ensayo de angularidad del agregado grueso (ASTM D5821), el ensayo de angularidad del agregado fino (AASHTO T 304, ASTM C1252) y el ensayo de partículas planas y alargadas (ASTM D4791). En general, los criterios de aceptación usados para estos parámetros son más estrictos a medida que aumenta el tráfico y cuando la mezcla se coloca más cerca de la superficie del pavimento.

Una partícula se considera plana y alargada si la relación entre su dimensión más larga y su dimensión más pequeña es mayor que 5:1. Las partículas planas y alargadas tienden a romperse durante la mezcla y el manejo, lo que cambia las propiedades del esqueleto del agregado. Al establecer un límite en la proporción de partículas con estas características, se reduce el potencial de fractura del agregado durante la producción y la construcción.

3.3.4 Absorción

La cantidad de ligante que es absorbida por el agregado puede afectar significativamente las propiedades de la mezcla asfáltica. Si las partículas del agregado tienen una alta absorción de asfalto, el contenido de asfalto en la mezcla debe incrementarse para compensar el ligante que es absorbido en los poros del agregado y que, por lo tanto, no está disponible como parte del espesor de película alrededor de esas partículas. Esto se considera en el diseño de mezclas asfálticas mediante el uso de la norma AASHTO R 30, *Acondicionamiento de Mezclas Asfálticas*. En este procedimiento, la mezcla asfáltica se acondiciona en el horno para permitir la absorción del ligante antes de realizar pruebas adicionales a la mezcla.

El contenido de asfalto en la mezcla debe aumentarse para compensar el ligante que es absorbido por los poros del agregado y que, por lo tanto, no está disponible como parte del espesor de película alrededor de esas partículas.

Si no se considera la absorción del ligante, la mezcla resultante tendrá un contenido efectivo de ligante más bajo (el ligante no absorbido que queda en la parte externa de las partículas). Esto no solo puede hacer que la mezcla sea seca y rígida, sino que también puede facilitar el desgajamiento, que es la desintegración de la superficie del pavimento debido al desprendimiento de los agregados.

Si se utilizan agregados absorbentes con altos contenidos de humedad, pueden surgir dificultades en el secado durante la producción del asfalto. Si estas dificultades son lo suficientemente severas, pueden requerir cambios en la tasa de producción u otros ajustes en el secador de la planta. No secar adecuadamente el agregado puede generar problemas de compactación y afectar la durabilidad a largo plazo del pavimento.

3.3.5 Contenido de Arcilla

El contenido de arcilla, también conocido como equivalente de arena (AASHTO T 176, ASTM D2419), es la cuarta de las propiedades de consenso de Superpave. La presencia de arcilla o finos plásticos en el agregado fino (material que pasa el tamiz de 4.75 mm [No. 4]) puede tener un efecto perjudicial en una mezcla asfáltica. Por ejemplo, los minerales de arcilla que recubren los agregados pueden impedir que los ligantes asfálticos se adhieran completamente a la superficie de las partículas del agregado, contribuyendo a la pérdida de adhesión entre el ligante asfáltico y el agregado, y aumentando el potencial de daño por agua en la mezcla asfáltica. Un mayor contenido de finos disminuirá la cantidad de asfalto necesaria para producir un 4% de vacíos de aire, lo que resulta en un menor espesor de película y una reducción en la durabilidad de la mezcla. Un exceso de finos tipo arcilla puede causar fisuras superficiales en el manto y disminuir la estabilidad de la mezcla.

Otra medida del contenido de arcillas dañinas y materia orgánica presente en un agregado es el valor de azul de metileno (AASHTO T 330, ASTM C837). En este método, se añade solución de azul de metileno por incrementos a agua destilada que contiene el material de la muestra que pasa el tamiz de 75 micrones (µm) (No. 200). Se extrae una pequeña cantidad del agua que contiene la muestra y el azul de metileno añadido, usando una varilla de vidrio, y se deja caer sobre papel filtro. Cuando la fracción de arcilla del agregado ya no puede absorber más azul de metileno, se forma un anillo azul en el papel filtro. Un valor alto de azul de metileno indica una gran cantidad de arcilla o material orgánico presente en la muestra.

3.3.6 Resistencia del Agregado

La resistencia del agregado se considera una propiedad de origen en el sistema Superpave. No se logró un consenso nacional sobre los procedimientos de ensayo específicos ni los valores críticos para estas propiedades. Sin embargo, estas propiedades pueden ser importantes en ciertas regiones. Los ensayos de resistencia se utilizan para determinar el potencial de un agregado para degradarse (producción de finos y pérdida de angularidad) durante el manejo, la producción y la colocación de la mezcla asfáltica en caliente (HMA). Las dos pruebas de resistencia más comunes son el ensayo de abrasión Los Ángeles (AASHTO T 96, ASTM C131) y el ensayo Micro-Deval (AASHTO T 327, ASTM D6928). El ensayo de abrasión Los Ángeles evalúa el potencial de degradación del agregado en condición seca. Algunos agregados pueden degradarse de manera diferente en condiciones secas frente a condiciones húmedas, por lo que el ensayo Micro-Deval se utiliza para evaluar el potencial de degradación en presencia de agua.

3.3.7 Durabilidad del Agregado

Otros ensayos de propiedades de origen suelen incluir pruebas de durabilidad. Las pruebas de durabilidad (AASHTO T 104, ASTM C88) estiman la resistencia de los agregados al desgaste causado por las condiciones climáticas en servicio, especialmente en zonas donde ocurren ciclos de congelamiento y deshielo. Estas pruebas simulan la absorción, congelación y descongelación del agua dentro de las partículas del agregado, sumergiendo los agregados en una solución salina de sulfato de sodio o de magnesio y luego deshidratándolos y rehidratándolos repetidamente. Al rehidratarse, las sales que han sido absorbidas por el agregado se expanden para simular la

expansión del agua al congelarse. El sulfato de magnesio es más agresivo, por lo que los límites de pérdida generalmente son mayores que los de las soluciones de sulfato de sodio.

3.3.8 Materiales Perjudiciales

Otra propiedad de origen que a menudo se especifica es el porcentaje máximo permitido de materiales perjudiciales. Estos materiales son inadecuados porque realmente son perjudiciales: causan daño o afectan la mezcla asfáltica. Generalmente se definen como el porcentaje en peso de contaminantes no deseados, como terrones de arcilla, lutita blanda, carbón, madera o mica. La prueba más común para materiales perjudiciales es el ensayo de terrones de arcilla y partículas friables (AASHTO T 112, ASTM C142). Las diferentes agencias especifican un rango muy amplio de porcentajes máximos permitidos, desde tan solo 0.2 por ciento hasta valores de hasta 10 por ciento. Cabe señalar que muchos materiales perjudiciales tienen una baja gravedad específica, por lo que especificaciones en el rango alto pueden permitir mucho más material perjudicial en el agregado del que la entidad realmente desea.

3.3.9 Materiales Reciclados

La industria del asfalto tiene una larga historia de reciclar sus pavimentos y de usar materiales provenientes de fuentes no tradicionales dentro de los pavimentos. Aunque varios materiales se han incorporado en pavimentos asfálticos, este manual solo abordará los dos más comunes: el asfalto recuperado (RAP) y las tejas asfálticas recicladas (RAS).

3.3.9.1 Asfalto Recuperado

El RAP se ha usado como componente de nuevas mezclas asfálticas por muchos años. La mayor parte del RAP se produce mediante el fresado de pavimentos asfálticos existentes. El RAP también se obtiene triturando y cribando cualquier pavimento asfáltico existente hasta lograr un tamaño adecuado para usarlo como componente de una nueva mezcla asfáltica. Generalmente, no se permite el uso de RAP en la capa superficial de pavimentos aeroportuarios, excepto en los hombros, debido a preocupaciones sobre FOD.

Como el RAP generalmente está compuesto de los mismos elementos que una mezcla virgen — agregado y ligante asfáltico— puede incorporarse fácilmente en una nueva mezcla. Desde el punto de vista económico, existe un beneficio al usar RAP de manera adecuada, ya que reduce el costo asociado con la compra de materiales nuevos (vírgenes).

El reúso de los recursos existentes presentes en el RAP ofrece un beneficio ambiental significativo, al disminuir la necesidad de extraer, transportar y refinar nuevos materiales.

La procedencia, el acopio y la variabilidad del RAP son consideraciones críticas tanto en el diseño de la mezcla como en el control de calidad durante la producción. Para usar adecuadamente RAP en una mezcla asfáltica, el productor debe conocer su origen y, de ser posible, mantener pilas separadas según proyectos específicos. Un RAP obtenido de una calle urbana o de un estacionamiento puede tener propiedades de ligante, contenido de ligante, propiedades físicas del

agregado y gradación considerablemente diferentes a las de un RAP obtenido de una autopista o de un aeródromo. Se debe realizar un muestreo y ensayo frecuente de los acopios de RAP para determinar las propiedades reales del material.

Como el RAP generalmente está compuesto por los mismos elementos que una mezcla virgen —agregado y ligante asfáltico— puede incorporarse fácilmente en una mezcla nueva.

Es importante recordar que la parte del ligante presente en el RAP ha sido envejecida durante la producción original en planta y luego envejecida aún más a lo largo de muchos años de servicio en el ambiente. Este envejecimiento hace que el ligante sea más rígido y menos flexible. Los ambientes más cálidos tienden a envejecer más el pavimento, resultando en un ligante de RAP aún más rígido. El grado AASHTO M 320 del ligante en el RAP puede ser de tres a cuatro grados más rígido que el grado base ambiental utilizado en esa ubicación.

La parte del agregado en el RAP requiere menos consideración. El agregado del RAP ya habrá absorbido ligante en sus poros y no absorberá ligante adicional de la nueva mezcla. Esto se refleja en los requisitos de AASHTO M 323 para los ensayos de agregados provenientes de RAP.

Las tres propiedades de consenso de Superpave relacionadas con la forma de las partículas — angularidad del agregado grueso, angularidad del agregado fino y partículas planas y alargadas— aún deben ensayarse en el agregado del RAP después de quemar o extraer el ligante del RAP. Como el agregado del RAP retiene al menos parte del ligante incluso después de ser quemado o extraído, los resultados del ensayo de equivalente de arena se ven afectados y, por lo tanto, este ensayo no se exige para el agregado del RAP.

La consideración principal para el agregado del RAP es el porcentaje que pasa el tamiz No. 200 (P200), el cual normalmente es lo suficientemente alto como para limitar el uso de RAP por razones volumétricas.

3.3.9.2 Tejas Asfálticas Recuperadas

El uso de RAS como componente en mezclas asfálticas puede resultar atractivo desde una perspectiva económica y ambiental inicial. El RAS tiene un alto porcentaje de ligante asfáltico — normalmente entre 20 y 30 por ciento— en comparación con el RAP, que generalmente tiene un contenido de ligante de 4 a 8 por ciento. Dado que el ligante asfáltico suele ser el componente más costoso de una mezcla asfáltica, usar un material recuperado con un alto contenido de asfalto puede ser muy beneficioso para un contratista.

Lamentablemente, el ligante asfáltico presente en el RAS, que se fabrica de manera distinta a los ligantes de grado para pavimentación, es extremadamente rígido. Algunas investigaciones sugieren que el ligante del RAS puede ser equivalente a un PG 142 o incluso mayor, con un punto de ablandamiento superior a 120 °C. Es difícil determinar de manera confiable sus propiedades físicas utilizando los equipos y procedimientos convencionales de ensayo de ligantes. Un método que se ha utilizado con cierto éxito consiste en mezclar una cantidad conocida de un ligante más suave con el ligante rígido del RAS y extrapolar los resultados del ensayo para

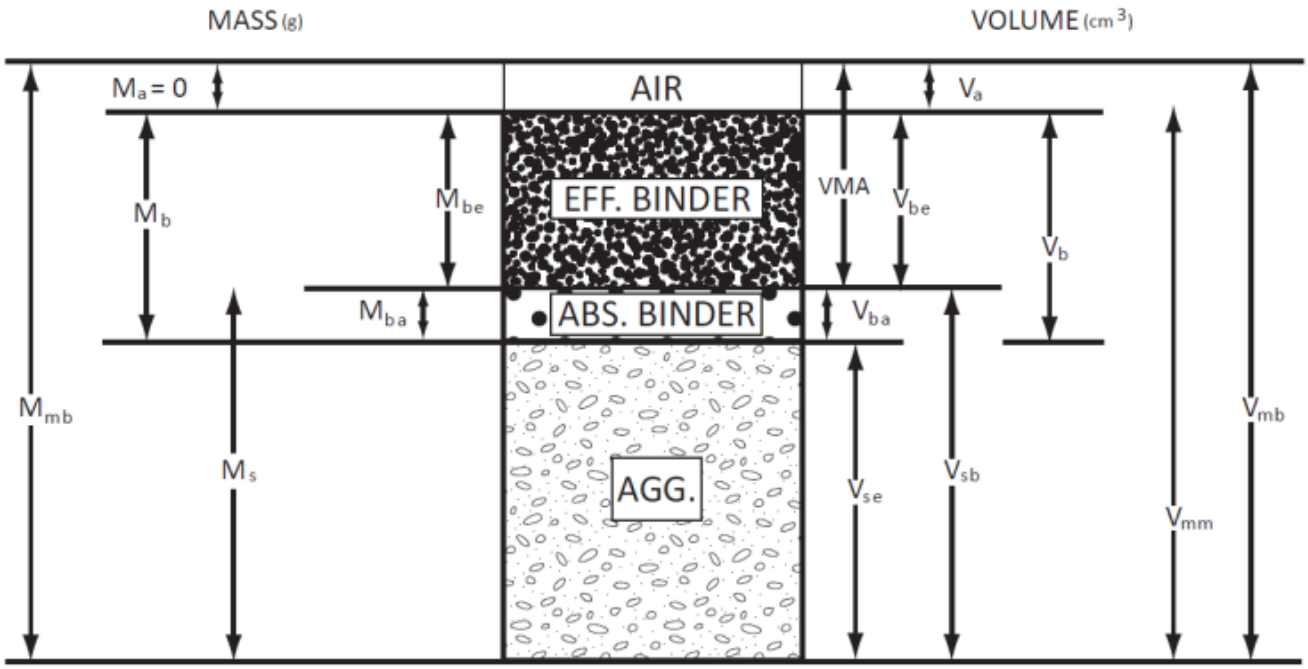
estimar las propiedades del ligante del RAS. En cualquier caso, esto limita la capacidad de predecir de forma fiable el desempeño del ligante asfáltico en campo usando la especificación PG para ligantes asfálticos.

Además del problema de cómo caracterizar las propiedades físicas del ligante del RAS, muchos especialistas del asfalto cuestionan el grado de mezcla (o activación) que realmente ocurre en una mezcla asfáltica entre un ligante virgen (más suave) y el ligante contenido en el RAS. Esta preocupación es aún mayor en mezclas producidas a temperaturas reducidas usando tecnologías de mezcla tibia.

A pesar de estos inconvenientes, varias agencias tienen experiencia usando RAS en porcentajes pequeños y han quedado satisfechas con el desempeño del pavimento. Desde un punto de vista de sostenibilidad, el uso de RAP y RAS en pavimentos asfálticos puede reducir la cantidad de ligante asfáltico nuevo y de agregados necesarios en las mezclas, lo que ayuda a estabilizar el costo de las mezclas y a conservar recursos naturales.

3.4 VOLUMETRÍA DE MEZCLAS

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactada son criterios importantes mediante los cuales históricamente se ha evaluado la calidad de una mezcla asfáltica. Las propiedades volumétricas se determinan usando las mediciones de masa y/o volumen de la mezcla y de sus componentes (ligante, agregado y aire), como se muestra en el diagrama de fases de la Figura 13. En general, estas propiedades han proporcionado una buena indicación del desempeño probable de la mezcla durante su vida útil.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 13. Diagrama de fases de la mezcla de asfalto

Un diseño de mezcla volumétrica suele ir seguido de una o más pruebas de desempeño para evaluar cómo responde la mezcla a ciertos esfuerzos en condiciones controladas. Las siguientes subsecciones discuten brevemente los parámetros volumétricos comúnmente especificados.

3.4.1 Contenido de Ligante de Asfalto

Dado que solo el ligante en la superficie de los agregados es útil para unirlos, esa porción del contenido total de ligante se llama contenido efectivo de ligante. La porción restante del contenido total de ligante se denomina ligante absorbido. Cabe destacar que la capacidad de absorción de los agregados es limitada, por lo que agregar más ligante por encima de la capacidad de absorción del agregado no aumentará el porcentaje de ligante absorbido.

3.4.2 Porcentaje de Vacíos de Aire

Los vacíos de aire en una mezcla de asfalto compactada consisten en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado recubiertas.

Los técnicos suelen usar los términos "porcentaje de densidad" y "porcentaje de vacíos de aire" al referirse a la misma característica de la mezcla. Cuando el porcentaje se expresa como un porcentaje de la gravedad específica máxima teórica, la relación entre ambos se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Porcentaje de densidad} = 100 - \text{porcentaje de vacíos de aire, o}$$

$$\text{Porcentaje de vacíos de aire} = 100 - \text{porcentaje de densidad}$$

Es importante no confundir los vacíos de aire de las probetas moldeadas en laboratorio con los vacíos de aire del núcleo de la carpeta asfáltica. Las probetas de laboratorio se compactan a tasas específicas utilizando máquinas calibradas en moldes de acero que proporcionan confinamiento constante. Las probetas de la carpeta se cortan de una carpeta compactada con rodillos de distintos tipos y tamaños, usando un número de pasadas no prescrito, y dependen de la mezcla de asfalto circundante y de la capa de adherencia para el confinamiento. Los vacíos de aire de laboratorio proporcionan información sobre la calidad de la mezcla de asfalto, mientras que los vacíos de aire del núcleo de la carpeta brindan información sobre la calidad del esfuerzo de compactación en la carpeta.

3.4.3 Vacíos en el agregado mineral

El término vacíos en el agregado mineral (VMA, por sus siglas en inglés) se define como el espacio intergranular entre las partículas de agregado en una mezcla de pavimento compactada, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA representa el espacio disponible para alojar el volumen efectivo de ligante (es decir, el ligante no absorbido por el agregado) más el volumen de vacíos de aire en la mezcla.

Una mezcla de asfalto necesita un porcentaje mínimo de VMA para disponer de suficiente espacio que contenga tanto la cantidad adecuada de vacíos de aire como la cantidad adecuada de ligante. Si el VMA es demasiado bajo, la mezcla no tiene suficiente espacio de vacíos para albergar las cantidades correctas de ligante efectivo y vacíos de aire.

Si la mezcla tiene suficientes vacíos de aire, pero no suficiente ligante, el espesor de la película de asfalto es demasiado delgado y el pavimento se vuelve menos durable. Si la mezcla tiene suficiente ligante pero no suficientes vacíos de aire, la mezcla se vuelve menos estable.

3.4.4 Vacíos Llenos de Asfalto

Vacíos llenos de asfalto (VFA, por sus siglas en inglés) es el porcentaje, en volumen, del VMA que está ocupado por el ligante efectivo. Al igual que el VMA, el VFA tiende a aumentar a medida que la mezcla se vuelve más fina y la superficie total del agregado crece.

El VFA se calcula para asegurar que la porción efectiva de asfalto del VMA en la mezcla esté dentro del rango adecuado. Si el VFA es demasiado bajo, la mezcla está demasiado seca y mostrará poca durabilidad. Si el VFA es demasiado alto, la mezcla está demasiado rica y puede volverse plástica e inestable.

El rango aceptable de VFA varía según la situación de carga de la carpeta asfáltica. Cargas más altas requieren un VFA menor, porque la resistencia y estabilidad de la mezcla son más importantes. Situaciones de carga más bajas permiten un VFA mayor para aumentar la durabilidad del pavimento asfáltico.

3.4.5 Proporción de Finos

La relación polvo-ligante de una mezcla de pavimento, a veces llamada proporción de finos es la relación entre el porcentaje de agregado que pasa por el tamiz de 0,075 mm y el ligante efectivo. Esta propiedad generalmente se calcula solo para mezclas de granulometría densa.

En general, esta propiedad está relacionada con la trabajabilidad de las mezclas de asfalto. Una proporción de finos baja suele dar lugar a una mezcla blanda, que carece de cohesión y es difícil de compactar correctamente en el campo, porque tiende a deformarse y desplazarse lateralmente bajo el rodillo. Una proporción de finos alta puede causar problemas de durabilidad debido al aumento de la superficie del agregado.

3.5 PROPIEDADES DE LA MEZCLA DE ASFALTO

Una mezcla de asfalto puede diseñarse para poseer muchas propiedades específicas. Ninguna combinación única de agregados y ligante maximizará todas las propiedades deseadas que se discuten en el resto de esta sección. El objetivo del diseño de la mezcla es seleccionar una combinación única y económica de agregados y ligante que logre un buen equilibrio de las propiedades deseadas.

3.5.1 Estabilidad

La fricción interna proporcionada por las partículas de agregado y la cohesión proporcionada por el ligante de asfalto brindan estabilidad a la mezcla asfáltica. La fricción entre las partículas de agregado está relacionada con la forma y la textura superficial de los agregados finos y gruesos, así como con las características de la granulometría del agregado. La cohesión resulta de la capacidad de unión y de las características de rigidez del ligante de asfalto. Un grado adecuado

de tanto la fricción entre partículas como la cohesión en una mezcla evitan que ésta se desplace en respuesta a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

El objetivo del diseño de la mezcla es seleccionar una combinación única y económica de agregados y ligante que logre un buen equilibrio de las propiedades deseadas.

El uso excesivo de agregados redondeados, como arena o grava natural, a menudo genera problemas de inestabilidad, como formación de surcos, desplazamientos y blandura de la mezcla. Las arenas naturales también pueden variar significativamente en la angularidad de los agregados finos y, a menudo, se limitan a un máximo del 15 % para abordar estos problemas. La estabilidad aumenta al utilizar agregados más angulares con textura superficial más rugosa.

Usar demasiado ligante (en relación con el contenido óptimo determinado durante el diseño de la mezcla) o un ligante demasiado blando (para las condiciones ambientales y de tráfico) puede causar surcos y desplazamientos (como se muestra en la Figura 14). La estabilidad aumentará al usar un ligante más rígido y/o al reducir el contenido de ligante hacia el valor óptimo.

Fuente: Centro Nacional de Tecnología del Asfalto
Figura 14. Formación de surcos debido a una mezcla de superficie inestable

3.5.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico es su capacidad para resistir agrietamientos y desintegración superficial (como se muestra en la Figura 15). Los agrietamientos y la desintegración superficial suelen deberse al envejecimiento del ligante, a la desintegración del agregado y/o al desprendimiento de la película de asfalto del agregado (ver Figura 16). Estos

factores que se ven afectados por la densidad en el lugar, las condiciones climáticas, el tráfico y las incompatibilidades entre el agregado y el ligante.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 15. Superficie de pavimento asfáltico desintegrada

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 16. Desprendimiento en la interfaz de la capa

En general, durante el diseño de la mezcla, la durabilidad de una mezcla se mejora mediante lo siguiente:

- Cantidad suficiente de ligante (en relación con el contenido óptimo de asfalto). Un ligante insuficiente dará lugar a una mezcla seca, propensa al envejecimiento, agrietamientos prematuros y desintegración superficial. El contenido de ligante y la superficie total del agregado determinan el espesor de la película de asfalto. Las películas de asfalto gruesas no envejecen ni se endurecen tan rápidamente como las delgadas. Es importante notar que crear espacio para un contenido suficiente de ligante (es decir, una película de asfalto más gruesa) depende del VMA. Como se discutió en la Sección 3.4.3, este espacio se llena con aire y ligante. Añadir más ligante sin aumentar el VMA simplemente reemplaza los vacíos de aire por ligante. Un VMA suficiente permite espacio tanto para el contenido adecuado de vacíos de aire como para el contenido adecuado de ligante.
- Agregado sólido y resistente que se mantenga sin desintegrarse bajo la carga del tráfico.
- Combinaciones compatibles de ligante de asfalto y agregado que ayuden a prevenir daños por humedad.
- Aditivos como cal hidratada o agentes líquidos anti-desprendimiento que se pueden incorporar al diseño de la mezcla para prevenir el desprendimiento.
- Ligante con un grado adecuado para bajas temperaturas o grado MSCR, que resista agrietamientos cuando el pavimento se contrae en climas fríos.

La Figura 17 muestra cómo funciona una mezcla muy duradera y resistente a combustibles en un aeródromo. Un V-22 Osprey está siendo repostado en caliente en el Aeropuerto Regional de Lynchburg, Virginia. Los motores continúan funcionando durante el procedimiento de repostaje de 35 minutos. La durabilidad y resistencia al combustible de la mezcla provienen principalmente de una combinación de factores que actúan juntos: un ligante de asfalto modificado (PG 82-28 o PG 88-22), alto contenido de ligante con consecuentes bajos vacíos de aire de laboratorio (1,5 a 3,5 %) y alta densidad de la carpeta (mínimo 96 %).

Fuente: Ron Corun

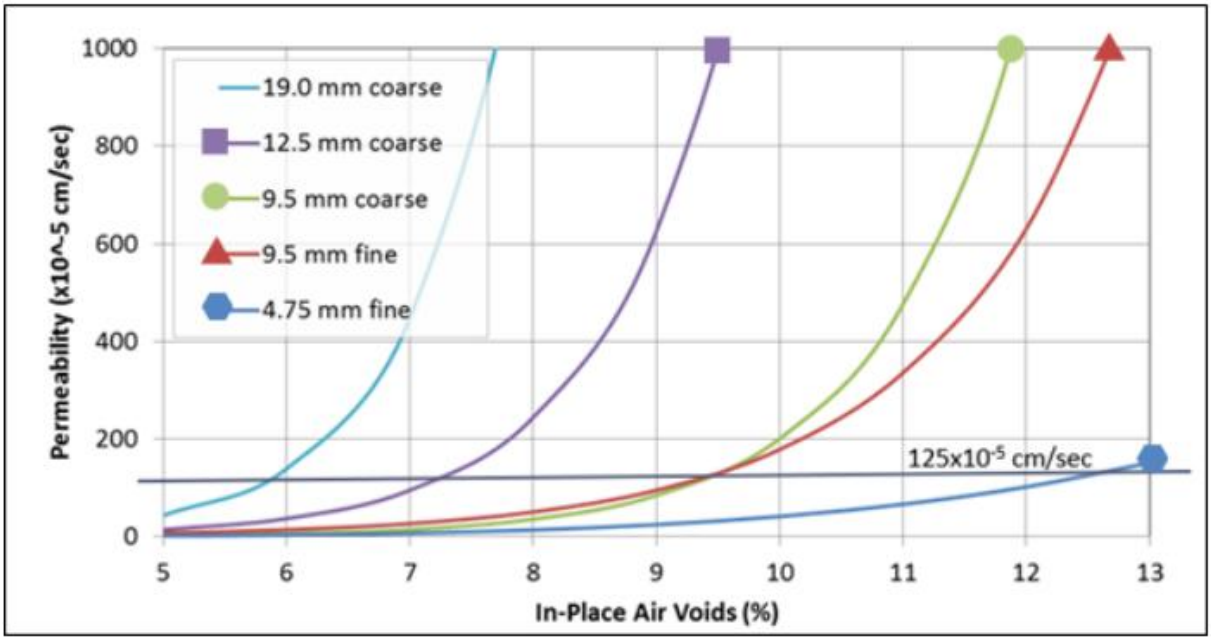
Figura 17. Mezcla resistente a combustibles en el Aeropuerto Regional de Lynchburg

3.5.3 Impermeabilidad

Cuando un pavimento asfáltico es impermeable, se impide o se restringe en gran medida el paso de aire y agua a través del pavimento. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de aire, la granulometría del agregado y el espesor de la capa de la mezcla compactada.

La Figura 18 utiliza datos del Informe 03-02 del Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (NCAT), *Una evaluación de los factores que afectan la permeabilidad de pavimentos diseñados con Superpave.* Para aquellas agencias que especifican una permeabilidad máxima, se muestra en el gráfico un límite superior común de 125×10^{-5} cm/s^2. El informe del NCAT concluyó lo siguiente:

- El contenido de vacíos de aire en mezclas de asfalto de granulometría densa tiene un efecto significativo en la permeabilidad del pavimento. A medida que los vacíos de aire en el lugar disminuyen, la impermeabilidad aumenta.
- El tamaño máximo nominal de agregado (NMAS) de las mezclas de asfalto de granulometría densa tiene un efecto significativo en la permeabilidad del pavimento. A medida que el NMAS de la mezcla disminuye, la impermeabilidad aumenta.
- Las pruebas de laboratorio en probetas de diferentes espesores mostraron que la impermeabilidad aumenta al incrementarse el espesor de la carpeta.



Fuente: Centro Nacional de Tecnología del Asfalto (Informe NCAT 03-02)

Figura 18. Permeabilidad en función de los vacíos de aire in situ según el NMAS

3.5.4 Trabajabilidad/Compactibilidad

La trabajabilidad describe la facilidad con la que una mezcla asfáltica puede colocarse y compactarse. Las mezclas con buena trabajabilidad son relativamente fáciles de colocar y compactar; aquellas con poca trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad es especialmente importante

cuando se requiere colocación manual y rastrillado (enrasado) alrededor de tapas de registro, radios pronunciados y otros obstáculos

Varios factores impactan la trabajabilidad de la HMA (Mezcla Asfáltica en Caliente), incluyendo los siguientes:

- **Temperatura:** A medida que aumenta la temperatura de la mezcla asfáltica, su viscosidad disminuye, haciendo la mezcla más trabajable. Sin embargo, temperaturas excesivas pueden conducir a problemas tales como degradación del ligante y aumento de emisiones.
- **Tipo de ligante:** El tipo de ligante asfáltico utilizado puede afectar significativamente la trabajabilidad. Los ligantes modificados con polímeros, por ejemplo, pueden ser menos trabajables a ciertas temperaturas debido a su viscosidad aumentada.
- **Propiedades del agregado:** La forma, tamaño y gradación del agregado pueden influir en la trabajabilidad de la mezcla. Las mezclas con mayor NMAS (Tamaño Máximo Nominal delAgregado) o con formas de agregado más angulares tienden a ser menos trabajables.
- **Diseño de mezcla:** La combinación específica de ligante, agregado y cualquier aditivo en el diseño de mezcla influirá en la trabajabilidad. Ciertos diseños de mezcla, tales como SMA (Stone Mastic Asphalt) o mezclas con un alto porcentaje de materiales reciclados, pueden presentar desafíos de trabajabilidad.

Algunos factores que podrían hacer la mezcla menos trabajable a corto plazo, tales como ligantes modificados con polímeros y tipos de diseño de mezcla premium como SMA, típicamente mejoran el desempeño a largo plazo en general.

3.5.5 Resistencia a la Fatiga

La resistencia a la fatiga es la capacidad del pavimento para desempeñarse bajo cargas de rueda repetidas (tráfico) sin deteriorarse. La investigación muestra que los vacíos de aire, el contenido de ligante y la condición del ligante tienen un efecto significativo en la resistencia a la fatiga de una mezcla. A medida que aumenta el porcentaje de vacíos de aire en el pavimento, ya sea por diseño o por compactación inadecuada, la resistencia a la fatiga se reduce drásticamente. Asimismo, un pavimento que contenga ligante asfáltico que se ha envejecido significativamente o tiene cantidades excesivas de RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) sin la correspondiente modificación a la mezcla tendrá menos resistencia a la fatiga. La especificación de un ligante asfáltico modificado con polímeros puede mejorar significativamente la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, ya que puede aumentar el contenido efectivo de ligante.

El método más efectivo para mejorar la resistencia a la fatiga de un pavimento no es especificar una mezcla de mayor calidad sino aumentar el espesor estructural total en la fase de diseño del pavimento.

3.5.6 Resistencia al Deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la capacidad de una superficie asfáltica para proporcionar fricción adecuada a los neumáticos para frenado y dirección seguros, particularmente cuando la superficie está mojada. Para una buena resistencia al deslizamiento, la banda de rodadura del neumático debe mantener contacto con las partículas de agregado y no rodar sobre una película de agua atrapada entre la superficie del pavimento y el neumático (hidroplaneo). Las pistas de aeródromos de la FAA están ranuradas, como se muestra en la Figura 19, para evitar el hidroplaneo de la aeronave. Un pavimento con microtextura y macrotextura superficial adecuadas tendrá mayor resistencia al deslizamiento en relación con una superficie pulida. La microtextura consiste en longitudes de onda de 1 µm a 0.5 mm (0.0004 a 0.02 pulgadas), y la macrotextura consiste en longitudes de onda de 0.5 a 50 mm (0.02 a 2 pulgadas).

La resistencia al deslizamiento se mejora usando agregado duro, durable y angular (triturado) con una textura superficial rugosa. Los agregados gruesos deben resistir el pulimento (alisado) bajo el tráfico. Los agregados calcáreos (calizas) se pulen más fácilmente que los agregados silíceos (cuarzo).

Las mezclas que tienden a ahuellarse o exudar presentan problemas serios de resistencia al deslizamiento.

Fuente: Gonuc

Figure 19. Ranurado de una Pista de Aeródromo

3.6 ADITIVOS

Los aditivos a veces se utilizan en mezclas asfálticas para mejorar varias propiedades y/o mitigar impactos ambientales. Numerosos productos están en el mercado, pero esta sección discutirá los aditivos más comunes.

3.6.1 Asfalto Tibio

WMA (Asfalto Tibio) incluye tanto aditivos como tecnologías de planta que permiten que las mezclas asfálticas se produzcan a temperaturas más bajas de lo normal mientras se mantiene la trabajabilidad de la mezcla, extendiendo las ventanas de compactación y a menudo actuando como una ayuda de compactación.

3.6.1.1 Espumación

La espumación es un método común de producción de mezcla tibia que puede reducir la temperatura de mezclado requerida hasta 250 °F (121 °C) en algunos casos. La espumación utiliza una inyección de pequeñas cantidades de agua en el ligante asfáltico caliente mientras fluye a través de boquillas especiales de inyección de espuma. La rápida expansión del vapor crea burbujas microscópicas en el ligante que expanden el volumen de líquido y permiten que las mezclas se recubran completamente a una temperatura reducida.

Los aditivos a veces se utilizan en mezclas asfálticas para mejorar varias propiedades y/o mitigar impactos ambientales.

3.6.1.2 Aditivos Químicos

Una multitud de diferentes aditivos químicos están disponibles en el mercado de WMA. Estos productos se agregan típicamente ya sea premezclándolos con el ligante asfáltico en las instalaciones del proveedor o mediante adición en la planta de mezcla. El uso de estos productos puede reducir las temperaturas de mezclado significativamente más bajo que el proceso de espumación. Aquellos productos premezclados en la terminal de ligante asfáltico se manejan y usan sin necesidades de equipo especial. Otros productos deben almacenarse por separado en la planta y dosificarse con precisión en la planta según lo indicado por el proveedor del producto WMA. Los productores de mezcla asfáltica deben referirse a las recomendaciones del fabricante del aditivo cuando usen estos productos especiales. Las especificaciones del proyecto pueden dictar qué aditivos se pueden usar.

3.6.1.3 Aditivos Orgánicos

Los aditivos orgánicos típicamente vienen en forma de cera de parafina y cera esterificada de bajo peso molecular con mayor viscosidad que los ligantes asfálticos por debajo de su punto de fusión y menor viscosidad a temperaturas por encima de su punto de fusión. Cuando se mezclan a temperaturas por encima de su punto de fusión, hacen que la mezcla resultante sea más trabajable a temperaturas más bajas. Es importante que el punto de fusión del aditivo orgánico sea más alto que las temperaturas de servicio esperadas del pavimento para evitar problemas potenciales relacionados con el ahuellamiento o la deformación bajo carga.

3.6.2 Aditivos Líquidos Anti-Desprendimiento

Los químicos conocidos como aditivos líquidos anti-desprendimiento (LAS) se han utilizado para tratar la susceptibilidad a la humedad en pavimentos asfálticos. Funcionan reduciendo la tensión superficial entre el ligante asfáltico y los agregados, promoviendo una mejor adhesión. Algunas de las clases químicas de aminas que se usan como aditivos LAS incluyen aminas grasas, amidoaminas e imidazolinas. Todas contienen un hidrocarburo que tiene propiedades similares al asfalto y uno o más

grupos amino. Además de su química, los aditivos LAS pueden caracterizarse por propiedades tales como estabilidad térmica y almacenamiento, concentración, viscosidad y olor. Los aditivos LAS a menudo se agregan en la refinería o en la terminal del proveedor si se solicita. El método y la tasa de incorporación durante el diseño de mezcla deben ajustarse a las recomendaciones de los proveedores de ligante y LAS. Independientemente del tipo de LAS, la tasa de dosificación real debe determinarse mediante pruebas. Es posible que una dosificación aumentada reduzca los resultados de las pruebas.

A menudo es necesario resolver problemas de compatibilidad; ciertas geologías de agregado pueden desempeñarse mejor con ciertas formulaciones de LAS. La mayoría de las agencias mantienen una lista de productos calificados para LAS.

3.6.3 Cal Hidratada

La cal hidratada a veces se usa en mezclas asfálticas, principalmente para mejorar la resistencia al daño por humedad al reaccionar con la arcilla en o sobre las partículas de agregado. También puede usarse para rigidizar el ligante para mejorar la resistencia al ahuellamiento y potencialmente reducir el endurecimiento por envejecimiento. El USACE (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU.) reporta que la cal hidratada también se usa para reducir el deterioro bacteriano del asfalto en climas cálidos y húmedos.

La cantidad de cal hidratada necesaria para mejorar la sensibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica generalmente varía de 0.5 a 1.5 por ciento del peso seco del agregado. Típicamente se agrega ya sea seca o mezclada con agua como una lechada de cal.

La adición de cal hidratada impacta las propiedades volumétricas en la mezcla. Se recomienda que la manera de introducir cal durante el proceso de diseño de mezcla sea similar en naturaleza al método usado en el campo durante la producción de mezcla en planta. También se recomienda que el diseñador de mezcla optimice la cantidad de cal a agregar a la mezcla. La cantidad de cal requerida dependerá de la combinación de ligante y agregado usada en la mezcla.

Para información adicional sobre aditivos LAS y cal hidratada, véase la Síntesis 595 del Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Carreteras (NCHRP), *Prácticas para Evaluar y Mitigar la Susceptibilidad a la Humedad de Pavimentos Asfálticos.*

3.6.4 Fibras

Las fibras para mezclas asfálticas pueden generalmente agruparse en dos categorías:

- Fibras destinadas a detener o mitigar el escurrimiento en mezclas SMA.
- Fibras destinadas a estabilizar la mezcla e inhibir el ahuellamiento, agrietamiento y corrimiento.

Las fibras para mitigar el escurrimiento en SMA son típicamente fibras de celulosa o fibras minerales. Las fibras de celulosa son fibras de base vegetal hechas de plantas leñosas, aunque algunas son papel periódico reciclado finamente triturado. Las fibras de celulosa tienen alta absorción, lo que les ayuda a mantener altos contenidos de ligante sin escurrimiento. Las fibras de celulosa pueden

proporcionarse en forma suelta o en pellets y típicamente se agregan a una tasa de aproximadamente 0.3 por ciento del peso de la masa total de la mezcla.

Las fibras minerales (también llamadas lana mineral o lana de roca) se fabrican fundiendo minerales y luego formando físicamente fibras mediante hilado o extrusión. Los minerales usados para crear fibras minerales incluyen escoria o una mezcla de escoria y roca, basalto, brucita y carbono. Las fibras minerales son menos comunes y pueden proporcionarse en forma suelta o en pellets y típicamente se agregan a una tasa de aproximadamente 0.4 por ciento del peso de la masa total de la mezcla.

Las fibras destinadas a estabilizar la mezcla son típicamente poliéster, polipropileno, aramida o combinaciones de estas. Las fibras usadas para este propósito son fuertes, resistentes al calor y de 5 a 40 mm de longitud. Las fibras de poliacrilonitrilo pueden tener un punto de ablandamiento tan bajo como 430 °F (220 °C), mientras que las fibras de aramida tienen puntos de ablandamiento superiores a 800 °F (425 °C). Aunque estas fibras pueden no aumentar significativamente la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica, la investigación ha demostrado que aumentan significativamente la energía de fractura, mejorando así la resistencia al agrietamiento y la propagación de grietas. Estas fibras se agregan más comúnmente a una tasa de 0.065 a 0.1 por ciento del peso de la masa total de la mezcla.

Watch Video:
Materials in a Job Mix Formula

3.7 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE MEZCLA

Para producir un diseño de mezcla asfáltica, el ligante asfáltico y el agregado se mezclan juntos en diferentes proporciones en el laboratorio. Las mezclas resultantes se evalúan usando un conjunto estándar de criterios para permitir la selección de un contenido óptimo de ligante (OBC). El tipo y gradación del agregado y el tipo y cantidad del ligante asfáltico influyen en las propiedades físicas de la mezcla. El contenido de ligante de diseño (u óptimo) se selecciona para asegurar un equilibrio entre la durabilidad a largo plazo de la mezcla y su resistencia al ahuellamiento (estabilidad).

3.7.1 Método Superpave

AASHTO M 323 Diseño de Mezcla Volumétrico Superpave y R 35 Diseño Volumétrico Superpave para Mezclas Asfálticas establecen las prácticas y especificaciones de EE.UU. para el método volumétrico de diseño de mezcla Superpave. Muchas agencias complementan el método volumétrico con pruebas adicionales para evaluar otras propiedades tales como la resistencia al ahuellamiento y agrietamiento de la mezcla. El compactador giratorio Superpave (véase Figura 20) se usa para compactar especímenes de mezcla asfáltica.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 20. Compactador Giratorio Superpave®

Para elaborar un diseño de mezcla asfáltica, el ligante asfáltico y el árido se mezclan en diferentes proporciones en el laboratorio. Las mezclas resultantes se evalúan utilizando un conjunto estándar de criterios para permitir la selección del contenido óptimo de ligante (OBC).

El diseño de mezcla volumétrico se logra en cuatro pasos: 1) selección de materiales componentes, 2) selección de estructura de agregado de diseño, 3) selección de contenido de asfalto de diseño, y 4) evaluación de la susceptibilidad a la humedad. La selección de los materiales componentes incluye la selección del ligante apropiado y agregado que cumplan con los parámetros de características de calidad requeridos proporcionados en las especificaciones del proyecto.

Después de que se han seleccionado los materiales componentes que cumplen con los requisitos de calidad, debe seleccionarse la estructura de agregado de diseño. La gradación de agregado de banda ancha se especifica ya sea por el NMAS de la mezcla en AASHTO M 323 o por número de gradación en especificaciones de aeródromos (la FAA P-401 y DoD UFGS 32 12 15.13).

La estructura de agregado puede simplemente preseleccionarse si el diseñador tiene suficiente historial/conocimiento de los materiales locales. Si el diseñador necesita seleccionar y evaluar agregados de múltiples fuentes o fuentes con las que carece de suficiente familiaridad, las mezclas de prueba normalmente se diseñan y evalúan. El diseñador estima el contenido óptimo de asfalto de cada mezcla de prueba, luego mezcla

y compacta especímenes. Las propiedades volumétricas subsecuentes para cada mezcla de prueba se evalúan para ver si cumplen con las especificaciones. Típicamente, la mezcla más rentable de agregados que cumplirá tanto con las especificaciones de laboratorio como de campo se selecciona como la estructura de agregado de diseño.

Luego se agrega ligante asfáltico a la estructura de agregado de diseño, típicamente en cualquier lugar de tres a cinco contenidos de ligante en intervalos de 0.5 por ciento que rodean el OBC estimado. Típicamente, se preparan y promedian dos especímenes idénticos en cada contenido de ligante para que la variabilidad pueda minimizarse. El OBC se selecciona típicamente como el contenido de ligante a un contenido de vacíos de aire preseleccionado. Para las especificaciones AASHTO M 323, el contenido objetivo de vacíos de aire es 4 por ciento. La FAA especifica 3.5 por ciento de vacíos de aire. Es importante verificar las especificaciones locales para el contenido objetivo de vacíos de aire. Las propiedades volumétricas en el OBC se determinan, y el diseñador asegura que la mezcla asfáltica cumpla con todas las especificaciones volumétricas a ese contenido de ligante.

El paso final en el método Superpave es determinar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. AASHTO M 323 específicamente requiere AASHTO T 283, Resistencia de Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad, para aprobar con una relación de resistencia a la tensión no menor de 0.80. Otras especificaciones pueden requerir valores de relación de resistencia a la tensión mínimos ligeramente diferentes.

3.7.2 Método Marshall

El Método Marshall de diseño de mezcla fue históricamente el método predominante de diseño de mezcla para mezclas asfálticas de gradación densa y se destaca por la portabilidad de su equipo. Al momento de escribir esto, todavía hay un DOT estatal usando el Método Marshall. Es un método opcional para mezclas de la FAA y DoD, y todavía es común fuera de Estados Unidos y Canadá.

Para una sola gradación de agregado seleccionada, se moldean especímenes a cinco diferentes contenidos de asfalto con martillos y moldes Marshall manuales o mecánicos. La FAA permite cualquier tipo de martillo de acuerdo con ASTM. El DoD especifica el martillo manual o el martillo mecánico calibrado al martillo manual. Una masa dada de mezcla asfáltica a una temperatura especificada se coloca en los moldes Marshall, y el martillo se usa para entregar 35, 50 o 75 golpes, dependiendo de la especificación. Luego se voltea el molde, y se entrega el mismo número de golpes al otro lado del espécimen. Típicamente, se preparan y promedian tres especímenes idénticos en cada contenido de ligante para que la variabilidad pueda minimizarse.

Además de las volumétricas de mezcla, el Método Marshall también aplica pruebas mecánicas en forma de pruebas de estabilidad y flujo (AASHTO T 245, ASTM D6927), que son precursores de las pruebas de Diseño de Mezcla Balanceado (BMD) que ahora están entrando en práctica común. Los especímenes se cargan en tensión indirecta usando un probador de compresión. El valor de estabilidad es básicamente la carga máxima que puede ser soportada por una muestra Marshall compactada, y el valor de flujo es la deformación correspondiente a la carga máxima. En la mayoría de los casos, el OBC debe seleccionarse

para el cual el espécimen compactado tiene 3.5 por ciento de vacíos de aire (FAA) o 4.0 por ciento de vacíos de aire mientras cumple con los criterios de estabilidad y flujo Marshall.

3.7.3 Método de Diseño de Mezcla Balanceado

Watch Video:
Balanced Mix Design for Airfield Mixtures

Los avances en las pruebas de desempeño trajeron el concepto de BMD para aumentar o incluso reemplazar el diseño volumétrico. BMD, como se define en el Circular E-C280 de la Junta de Investigación del Transporte (TRB), Glosario de Términos para Diseño Balanceado de Mezclas Asfálticas es "*un marco de diseño de mezcla asfáltica que usa pruebas mecánicas correlacionadas al desempeño en campo en especímenes apropiadamente acondicionados que abordan múltiples modos de deterioro de la capa asfáltica tomando en consideración el envejecimiento de la mezcla, el tráfico, el clima y la ubicación dentro de la estructura del pavimento*". Aunque los modos primarios de deterioro considerados por la mayoría de los practicantes de BMD son el ahuellamiento y el agrietamiento, otros deterioros tales como la fragilidad (evaluada por la prueba de pérdida de masa Cantabro) también podrían considerarse en un proceso BMD. Es muy importante que cualquier prueba de desempeño utilizada esté bien correlacionada con el desempeño en campo.

Los avances en las pruebas de rendimiento llevaron al concepto de BMD a ampliar o incluso reemplazar el diseño volumétrico.

Al momento de escribir esto, los siguientes son los cuatro enfoques primarios al BMD para diseño de mezcla:

3.7.3.1 Enfoque D

Diseño de Desempeño BMD. Este enfoque establece y ajusta los componentes y proporciones de la mezcla basándose en el análisis de desempeño con requisitos de agencia limitados o nulos para propiedades volumétricas. La agencia puede establecer requisitos mínimos para la calidad del ligante asfáltico y propiedades del agregado. Una vez que los resultados de las pruebas mecánicas cumplen con los criterios BMD, las propiedades volumétricas de la mezcla pueden verificarse para su uso en producción.

3.7.3.2 Enfoque C

Diseño Volumétrico Modificado BMD. Este enfoque comienza con el método de diseño de mezcla volumétrico para establecer propiedades preliminares de materiales componentes, proporciones y contenido de ligante asfáltico. Luego se usan los resultados de las pruebas mecánicas para ajustar ya sea el contenido preliminar de ligante asfáltico o las propiedades o proporciones de los componentes de la mezcla hasta que se satisfagan los criterios. Para este enfoque, el diseño final se enfoca principalmente en cumplir con los criterios de prueba BMD y puede no tener que cumplir con todos los criterios volumétricos de diseño de mezcla.

3.7.3.3 Enfoque B

Diseño Volumétrico con Optimización BMD. Este enfoque es una versión expandida del Enfoque A. También comienza con el método de diseño de mezcla volumétrico para determinar un OBC preliminar. Luego se conducen pruebas mecánicas de mezcla asfáltica en

el diseño de mezcla al OBC preliminar y dos o más contenidos adicionales. El contenido de ligante asfáltico que satisface todos los criterios de prueba se identifica como el OBC final u objetivo. En casos donde los criterios de prueba BMD no se cumplen en ninguno de los contenidos de ligante, todo el proceso de diseño de mezcla necesita repetirse usando diferentes proporciones de mezcla o materiales hasta que se satisfagan todos los criterios de prueba BMD.

3.7.3.4 *Enfoque A*

Diseño Volumétrico con Verificación BMD. Este enfoque comienza con el método de diseño de mezcla volumétrico para determinar un OBC. La mezcla asfáltica al OBC se prueba luego con las pruebas mecánicas seleccionadas para evaluar su resistencia a los deterioros de interés. Si el diseño de mezcla cumple con los criterios de prueba, se establece la JMF (Fórmula de Mezcla de Trabajo) y comienza la producción. Si el diseño de mezcla no cumple con los criterios de prueba, se repite todo el diseño de mezcla usando diferentes proporciones de mezcla o materiales hasta que se satisfagan todos los criterios de prueba volumétricos y BMD.

Una buena referencia para más detalles es la publicación IS-143 de NAPA "Guía de Recursos de Diseño de Mezcla Balanceado". La Tabla 3 resume cada enfoque.

Tabla 3. Resumen de Enfoques BMD

Enfoque BMD	Requisitos Volumétricos	Requisitos de Pruebas Mecánicas de Mezcla	Flexibilidad	Potencial de Innovación
A: Diseño Volumétrico con Verificación BMD	Cumplimiento total	Cumplimiento total	Más conservador	Más bajo
B: Diseño Volumétrico con Optimización BMD	Cumplimiento total en OBC preliminar	Optimización BMD mediante cambios moderados en contenido de ligante asfáltico	Ligeramente más flexible que Enfoque A	Limitado
C: Diseño Volumétrico Modificado BMD	Algunos requisitos relajados o eliminados	Optimización BMD ajustando contenido preliminar de ligante asfáltico o propiedades o proporciones de componentes de mezcla	Menos conservador que Enfoque Ay Enfoque B	Grado medio
D: Diseño de Desempeño BMD	Requisitos limitados o nulos	Optimización BMD ajustando componentes y proporciones de mezcla	Optimización BMD ajustando componentes y proporciones de mezcla	Grado más alto

3.7.4 Consideraciones de RAP

El diseño de mezcla debe ser específico con respecto a la fuente del RAP y si ha sido fraccionado o no. Algunos contratistas fraccionan el RAP pasándolo sobre una o más cribas para producir pilas separadas gruesas y finas para una gradación más controlada. El fraccionamiento del RAP

puede reducir la variabilidad general de la mezcla final cuando se usan porcentajes más altos de RAP. El fraccionamiento también ayuda a los diseñadores de mezcla porque las pilas de RAP grueso y fino tienen diferentes propiedades, aumentando las formas en que el RAP puede influir en las propiedades volumétricas. La fracción fina del RAP fraccionado tendrá un mayor contenido de ligante mientras que la fracción gruesa tendrá un menor contenido de ligante, en relación con el mismo RAP si no fuera fraccionado.

Algunas agencias limitan la cantidad de RAP en la mezcla especificando un porcentaje máximo permitido por peso. Este es un enfoque aceptable cuando el porcentaje de ligante asfáltico en el RAP es relativamente similar al contenido total de ligante asfáltico de la mezcla. Con el aumento del uso de RAP fraccionado, muchas agencias ahora reconocen la necesidad de especificar la cantidad de RAP en términos de la relación de ligante RAP—la relación del ligante RAP en la mezcla dividida por el contenido total de ligante de la mezcla. Los proyectos de aeródromos del DoD y la FAA actualmente no permiten el uso de RAP para mezclas de superficie, excepto en bermas.

Debido a que el ligante RAP ha sido significativamente envejecido y endurecido, las mezclas con grandes porcentajes de RAP tienden a ser más rígidas, menos trabajables y más difíciles de compactar durante la construcción en comparación con mezclas con un porcentaje menor de RAP. Si el impacto del ligante RAP envejecido no se aborda en el diseño de mezcla, la durabilidad de una mezcla con alto RAP también sufrirá. Las mezclas con alto RAP deben diseñarse con un ligante más blando, más ligante o aditivos de reciclaje para mejorar la durabilidad de la mezcla. El MS-2 del Instituto del Asfalto ofrece orientación detallada sobre ajustes de grado de ligante debido al uso de RAP, en resumen:

- El contenido de ligante asfáltico y la gradación deben determinarse para todos los niveles de RAP.
- A niveles bajos de RAP (menos del 15 por ciento), el ligante RAP más rígido tiene un efecto mínimo en la rigidez total del ligante de mezcla, por lo que no es necesario ajuste de grado.
- A niveles moderados de RAP (entre 15 y 25 por ciento), seleccione un grado más blando de lo normal (por ejemplo, seleccione un PG 58-28 si normalmente se usaría un PG 64-22 en una mezcla virgen).
- A niveles altos de RAP (mayores del 25 por ciento), será necesario determinar las propiedades físicas del ligante asfáltico extraído para que puedan usarse gráficas o ecuaciones de mezcla para seleccionar el grado apropiado de ligante virgen. Asumiendo que el ligante RAP se mezcla con el nuevo ligante a temperaturas de mezclado, un ligante nuevo más blando se mezcla con el ligante RAP más rígido, resultando en una mezcla de ligante que cumple con el grado requerido para el proyecto.

Una vez que se ha seleccionado el grado apropiado de ligante asfáltico virgen y el porcentaje de cada fuente de RAP, puede proceder el proceso normal de diseño de mezcla. Las pruebas BMD pueden ayudar enormemente en optimizar el proceso de diseño de mezcla usando RAP. Refiérase a la NAPA BMD Resource Guide para más información.

3.8 MEZCLAS PRODUCIDAS EN LABORATORIO VERSUS MEZCLAS PRODUCIDAS EN PLANTA

Como se señaló anteriormente, es probable que existan diferencias entre las propiedades de una mezcla asfáltica diseñada en el laboratorio y la "misma" JMF producida en una planta de lote o de tambor-mezclador (típicamente vacíos de aire y VMA - Vacíos en elAgregado Mineral). Es importante examinar esas diferencias y entender cómo y por qué las propiedades de prueba o características de una mezcla producida en una planta pueden variar significativamente de los resultados predichos por pruebas conducidas en material producido en laboratorio.

Estas revisiones usualmente se requieren por varias razones, incluyendo:

- Las muestras de agregado obtenidas para el diseño de mezcla típicamente tendrán menos degradación por manipulación en comparación con el agregado que pasa a través de la planta de producción.
- El ligante asfáltico probablemente será absorbido en las partículas de agregado a una tasa diferente durante el mezclado y almacenamiento en la planta de asfalto que en el laboratorio.
- El diseño de mezcla se realizó con agregado seco al horno, pesado al 0.1 g más cercano, mientras que el agregado de planta experimenta condiciones de humedad siempre cambiantes que no pueden contabilizarse perfectamente en la banda de pesaje de la planta en movimiento continuo.
    - A menos que los sistemas de alimentación de agregado de la planta estén perfectamente calibrados el 100 por ciento del tiempo, los porcentajes de mezcla pueden ser ligeramente diferentes a los porcentajes pesados precisamente en una balanza en el laboratorio.
    - El diseño de mezcla puede haberse conducido y certificado usando material agregado producido meses o a veces años antes de que tenga lugar la producción del proyecto y no reflejar las propiedades del agregado de la mezcla que se está produciendo.

Factores como estos hacen casi inevitable que los porcentajes de mezcla de la mezcla necesiten ajustarse ligeramente en el campo para producir una mezcla dentro de las especificaciones.

Los contratistas de asfalto, productores e inspectores deben entender las políticas del propietario con respecto a los cambios permitidos al diseño de mezcla.

El problema más común encontrado en la mezcla producida en planta es la falla en cumplir con los parámetros volumétricos de VMA y vacíos de aire. Estas propiedades están relacionadas, ya que una prueba fallida de vacíos de aire es usualmente el resultado de un VMA cambiante—asumiendo que el contenido de ligante no cambia. El cambio en VMA se explica más frecuentemente por acondicionamiento inconsistente de la mezcla durante las pruebas o un cambio en la gradación y/o forma del agregado debido a la degradación durante la manipulación.

El acondicionamiento apropiado de la mezcla de las muestras es esencial para proporcionar propiedades volumétricas precisas. El tiempo y temperatura del acondicionamiento de la mezcla pueden afectar grandemente la cantidad de asfalto absorbido en el agregado, cambiando así la gravedad específica máxima de la

mezcla (G_{mm}) y, en menor medida, su gravedad específica aparente (G_{mb}). Por ejemplo, las muestras de Gmm tomadas en planta y analizadas inmediatamente pueden producir valores de G_{mm} significativamente más bajos. Esto se debe a que la mezcla tiene un mayor volumen debido a que el aglutinante no ha tenido tiempo suficiente para ser absorbido por el árido. Valores de G_{mm} artificialmente bajos resultan en una mayor densidad compactada en laboratorio (menos vacíos de aire) y un mayor porcentaje de compactación medido en núcleos de campo.

Si se permite un tiempo de acondicionamiento suficiente, el aglutinante se absorberá en la mezcla casi a la capacidad total de absorción del agregado, lo que resulta en un menor volumen de mezcla debido a que parte del aglutinante se ha movido del exterior de las partículas del agregado al interior. Posteriormente, el menor volumen de mezcla debido al mayor tiempo de acondicionamiento resultará en valores de Gmm más altos y densidades calculadas más bajas.

Para que las mezclas producidas en campo coincidan con los valores de diseño del laboratorio, las muestras de mezcla deben curarse a temperaturas similares durante un período de tiempo similar. Los agregados altamente absorbentes magnificarán la importancia de que el tiempo y la temperatura de curado coincidan entre el laboratorio y la obra.

En cuanto a la gradación, es importante recordar que el VMA es el resultado de la cantidad de empaquetamiento del agregado que se produce en el molde al colocarlo en el compactador de laboratorio. Cualquier cambio en el espacio entre huecos en la muestra afectará el VMA resultante. Un cambio en el porcentaje que pasa por un tamiz de agregado puede alterar las características de compactación de la mezcla y cambiar la forma en que encaja toda la estructura del agregado. La descomposición de los áridos es común al pasar del diseño de la mezcla en el laboratorio a la producción en planta en campo. Cada vez que el árido se manipula en la cantera, se carga y descarga en camiones, se introduce en tolvas frías y se transporta por la planta durante el secado y la mezcla, tiende a desgastar los bordes angulares y a generar más finos. Esta descomposición suele generar un mayor porcentaje de material de menos del n.° 200 (polvo) en relación con las muestras de árido utilizadas para el diseño de la mezcla, lo que resulta en menores vacíos de aire y menor VMA (colapso) para las muestras producidas en planta en comparación con el diseño de la mezcla, asumiendo el mismo contenido de aglutinante. Los diseñadores de mezclas pueden tener esto en cuenta al dosificar durante el proceso de diseño de la mezcla, añadiendo más polvo para minimizar la diferencia entre la granulometría de la mezcla de diseño y la de la mezcla producida.

Cuando las especificaciones solo exigen el monitoreo de los huecos de aire en la mezcla y no del VMA, este puede disminuir inadvertidamente. Es posible simplemente reducir la cantidad de ligante que se agrega a la mezcla para restablecer el nivel especificado de huecos de aire. Reducir el contenido de ligante puede corregir la desviación de los huecos de aire, pero deja la mezcla seca con una cantidad insuficiente de ligante para garantizar su durabilidad. Después de evaluar los procedimientos de muestreo y prueba para garantizar la estandarización de los parámetros de curado, se deben explorar las opciones para restaurar el VMA en la mezcla. Estas pueden incluir las siguientes, dependiendo de las propiedades específicas del agregado local:

- Realizar ajustes en las fracciones de los agregados para generar mayor VMA.
- Incrementar el contenido de caras fracturadas del agregado.
- Reducir el uso de arena natural e incrementar el uso de finos lavados en lugar de finos sin lavar.
- Aumentar la proporción de agregados intermedios (aunque en exceso puede generar inestabilidad en la mezcla).
- Reducir el polvo mineral mediante:
    - Lavar agregados con altos contenidos de polvo.
    - Incrementar el uso de agregados finos que contengan menores cantidades de polvo.
    - Utilizar un sistema de recuperación de polvo para reducir el retorno del mismo a la mezcla.

3.9 RESUMEN

El objetivo de probar mezclas asfálticas producidas en planta es comparar favorablemente los resultados de las pruebas con el método de mezcla de asfalto (JMF) del laboratorio. Esto suele ser difícil de lograr debido a todas las variables que existen en la planta, desde el tipo de planta utilizada hasta las condiciones específicas de operación. A menudo existen diferencias entre las mezclas de laboratorio y las de planta, en la granulometría de los áridos, su redondeo al pasar por la planta, el grado de endurecimiento del cemento asfáltico, el secado incompleto en el tambor y el desperdicio de finos a través del sistema de control de emisiones.

Por lo tanto, el JMF producido en el laboratorio debería servir como un buen punto de partida. Las propiedades deseadas de la mezcla deben comprobarse y verificarse en la mezcla asfáltica compactada en laboratorio, producida en planta. Se deben realizar pruebas diarias para determinar las características de la mezcla que se está produciendo (verificación de la mezcla). Todos los resultados de las pruebas de la mezcla deben estar dentro del rango de los requisitos de la especificación.

A menos que contradigan las especificaciones del proyecto, la siguiente guía puede ser útil al analizar mezclas producidas en planta. Si los resultados de las pruebas realizadas en la mezcla producida en planta indican que cumple con los requisitos del JMF, la planta debe continuar operando. Si una o más propiedades de la mezcla están fuera del rango deseado, se debe realizar una investigación rápidamente para determinar la causa y el alcance de la deficiencia. En la mayoría de los casos, no se debe cerrar la planta ni realizar cambios drásticos en el diseño de la mezcla basándose únicamente en un conjunto de resultados de prueba. Una muestra con resultados defectuosos debe ser seguida por un muestreo inmediato y análisis de material adicional, en lugar de esperar al siguiente muestreo aleatorio. Si los resultados de la segunda muestra confirman los de la primera, se deben tomar medidas inmediatas para que la mezcla vuelva a cumplir con los requisitos. Por lo general, es más conveniente que la mezcla producida en planta cumpla con los requisitos volumétricos que la gradación en campo coincida exactamente con el diseño de la mezcla.

4. Producción de Mezclas

4.1 INTRODUCCIÓN

Ver Video:
Production at a Drum Mix Plant

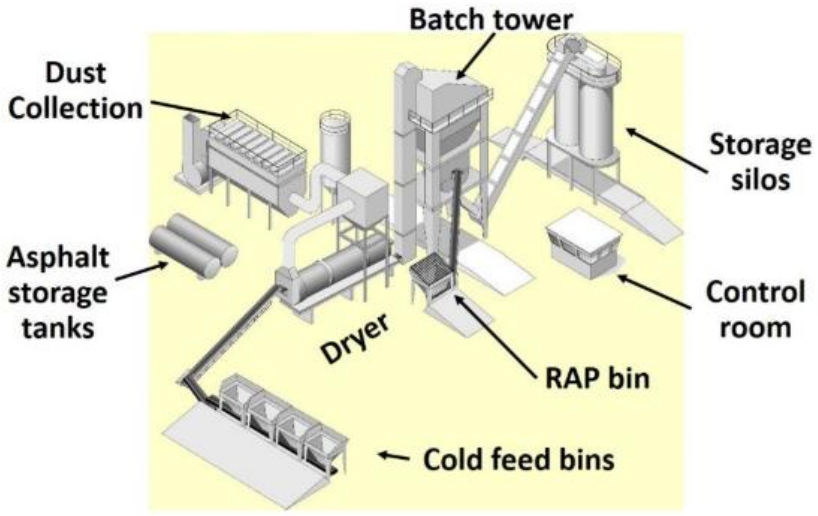
El objetivo de una planta de mezcla asfáltica es mezclar áridos y ligante asfáltico a temperatura elevada para producir una mezcla asfáltica homogénea para pavimentos.
Actualmente, existen dos tipos básicos de plantas para producir mezclas asfálticas en caliente (HMA): plantas discontinuas, y plantas de flujo continuo tipo tambor.
Independientemente del tipo de planta, el propósito fundamental es el mismo: producir una mezcla asfáltica dentro de un rango específico de temperatura, que contenga las proporciones establecidas de ligante asfáltico, agregados y los aditivos adicionales que sean requeridos. Tanto las plantas discontinuas como las plantas de tambor están diseñadas para cumplir este objetivo.
Las siguientes operaciones básicas involucradas en la producción de mezcla asfáltica son comunes a ambos tipos de planta:

- Almacenamiento y manejo adecuados de los componentes de la mezcla en la planta.
- Dosificación y alimentación precisa del agregado hacia el secador.
- Secado y calentamiento eficiente del agregado hasta alcanzar la temperatura requerida.
- Control y recolección eficiente del polvo proveniente del secador.
- Dosificación, alimentación y mezclado correcto del ligante asfáltico y los aditivos con el agregado caliente.
- Almacenamiento, descarga, peso y manipulación adecuada de la mezcla terminada.

La principal diferencia entre las plantas discontinuas y las plantas de tambor radica en cómo se mezclan el ligante asfáltico y los agregados después de que estos han sido dosificados, secados y calentados a la temperatura final de mezcla. En las plantas discontinuas, los agregados calientes se criban y fraccionan en tolvas separadas después de salir del secador. Luego, el ligante asfáltico y las fracciones de agregados se pesan individualmente en lotes predeterminados y se mezclan en un mezclador de doble eje, un lote a la vez (ver Figura 21).
En las plantas discontinuas, los agregados calientes se criban y fraccionan en tolvas independientes después de salir del secador. Posteriormente, el ligante asfáltico y las fracciones de agregados se pesan individualmente en lotes predeterminados y se mezclan en un mezclador de doble eje, un lote a la vez. En las plantas de flujo continuo tipo tambor, los agregados se secan y se mezclan con el ligante asfáltico mediante un proceso continuo dentro del tambor secador, lo cual caracteriza a este tipo de planta.

*En las **plantas discontinuas**, los agregados calientes se criban y fraccionan en tolvas independientes después de salir del secador. Posteriormente, el ligante asfáltico y las fracciones de agregados se pesan individualmente en lotes predeterminados y se mezclan en un mezclador de doble eje, un lote a la vez.*

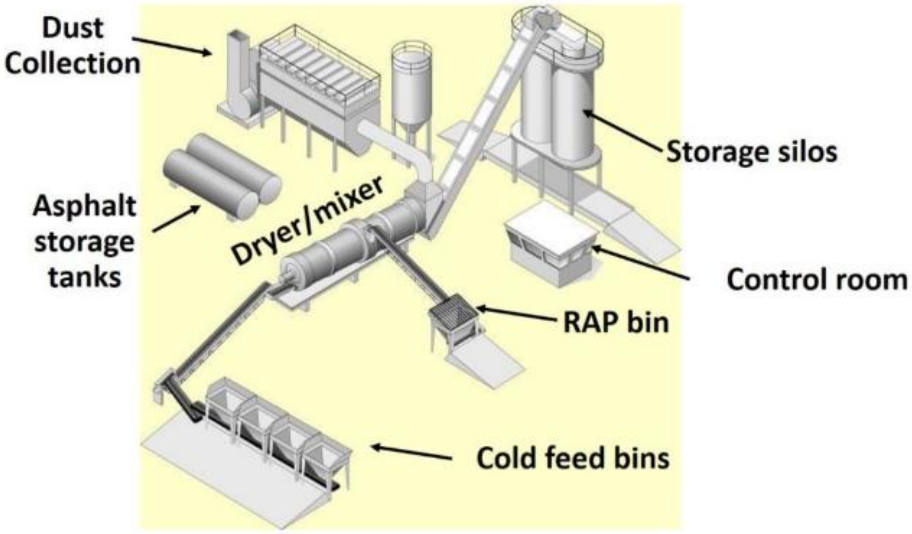
*En las **plantas de flujo continuo tipo tambor**, los agregados se secan y se mezclan con el ligante asfáltico mediante un proceso continuo dentro del tambor secador, lo cual caracteriza a este tipo de planta.*



Fuente: Instituto de Asfalto

Figura 21. Componentes de una planta discontinua

Las plantas de flujo continuo tipo tambor secan el agregado y lo mezclan con el ligante asfáltico mediante un proceso continuo dentro del tambor secador; de ahí proviene el nombre tambor mezclador (ver Figura 22).



Fuente: Instituto de Asfalto

Figura 22. Componentes de una planta de mezcla tipo tambor

Las operaciones uniformes y continuas son fundamentales para la producción de una mezcla asfáltica de calidad. La uniformidad garantiza que la mezcla se produzca consistentemente de acuerdo con las especificaciones del proyecto. Esto incluye un suministro uniforme de materiales, una dosificación constante y equilibrada, y una operación continua y estable de todas las funciones de la planta.

Figura 21. Torre de lotes, Recolección de polvo, Tanque de almacenamiento de asfalto, Tolvas de alimentación fría, Tolvas RAP, Sala de control, Silos de almacenamiento.
Figura 22. Recolección de polvo, Tanque de almacenamiento de asfalto, Secadora/mezcladora, Tolvas de alimentación fría, Tolvas RAP, Sala de control, Silos de almacenamiento.

4.2 ALMACENAMIENTO Y MANEJO DE MATERIALES

La calidad de la mezcla asfáltica producida es tan buena como los materiales que ingresan a la planta. Una condición indispensable para garantizar una producción de calidad es contar con un abastecimiento adecuado de materiales apropiados, tanto antes como durante las operaciones de mezclado. Las siguientes secciones describen los principios de manejo y control tanto del ligante asfáltico como de los agregados, comunes a todas las plantas de mezcla asfáltica.

4.2.1 Ligante Asfáltico

El ligante asfáltico es un material negro, termoplástico y cementante, cuya consistencia y viscosidad varían según la temperatura. Cuando se calienta lo suficiente, se ablanda y disminuye su viscosidad, permitiendo que sea bombeado y que recubra las partículas de agregado durante la producción de la mezcla asfáltica.

4.2.1.1 Recepción del ligante

En la mayoría de los casos, el ligante asfáltico proviene de una fuente previamente ensayada y se acepta mediante certificación. Se deben mantener registros de todas las entregas de ligante asfáltico que llegan a la planta. Dichos registros deben incluir la siguiente información:

- Grado del ligante asfáltico.
- Nombre y ubicación del proveedor o punto de envío.
- Identificación de la planta y del proyecto (si está dedicado a una obra específica).
- Fecha de entrega.
- Número de factura de la entrega.
- Certificación del grado y Hoja de Datos de Seguridad del Material (MSDS).
- Identificación de cualquier aditivo incorporado en la terminal de almacenamiento del ligante.
- Gravedad específica o peso unitario por galón a 60 °F (litros a 15 °C).
- Cantidad de ligante recibida, expresada en peso.

Registros similares deben mantenerse para todos los demás materiales (como relleno mineral, cal hidratada u otros aditivos incorporados a la mezcla).

4.2.1.2 Almacenamiento del ligante

El sistema de suministro de ligante asfáltico consta de dos componentes principales.
El primero incluye uno o más tanques utilizados para almacenar el ligante asfáltico hasta que sea necesario en la planta de mezclado. El segundo es un sistema de bombeo y medición utilizado para extraer el ligante asfáltico del tanque de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento de ligante asfáltico están aislados y calentados para mantener la temperatura correcta y asegurar que el ligante pueda ser bombeado y mezclado con el agregado caliente. Las temperaturas se mantienen típicamente mediante calentadores eléctricos controlados por termostato o un sistema de serpentines con aceite térmico, que hace circular aceite caliente a través de serpentines dentro del tanque de almacenamiento. El sistema mantiene la temperatura

adecuada del ligante asfáltico, generalmente en el rango de 300 °F (150 °C) a 350 °F (180 °C), dependiendo del tipo de ligante.
Los tanques que almacenan ligantes modificados suelen estar equipados con agitadores o paletas mezcladoras para mantener una circulación constante. Durante períodos cortos, se puede usar la circulación mediante las propias bombas de la planta de asfalto para el mismo propósito. Algunos ligantes asfálticos modificados pueden tener requerimientos específicos de agitación.
Se recomienda que los productores de mezcla asfáltica consulten al proveedor del ligante para conocer los requisitos adecuados de temperatura y almacenamiento.

4.2.1.3 Muestreo del ligante asfáltico

Las muestras de ligante asfáltico generalmente se toman desde una válvula de muestreo ubicada en la línea de entrega, entre el tanque de almacenamiento del ligante y la planta, después de que se hayan incorporado todos los aditivos en línea.

Cuando no se utilizan aditivos en línea, las muestras pueden tomarse mediante un dispositivo de muestreo ubicado en el vehículo de transporte, en la línea de descarga o directamente del tanque de almacenamiento.
A continuación, se presentan algunas reglas importantes que deben seguirse al realizar el muestreo del ligante asfáltico:

- Utilizar únicamente personal competente y debidamente capacitado para ejecutar el muestreo.
- Usar equipo de protección personal (EPP) —como guantes, careta facial y camisa de manga larga— para protegerse contra quemaduras.
- Asegurar que las muestras sean representativas de todo el envío, tomándolas exclusivamente de las válvulas de muestreo destinadas para ese propósito.
- Seguir los métodos de muestreo descritos en ASTM D140 y AASHTO T 40.
- Utilizar únicamente recipientes metálicos nuevos, limpios y secos para las muestras.
- Permitir que fluyan al menos 1 galón (4 L) de ligante a través de la válvula antes de recolectar la muestra representativa.
- Sellar inmediatamente los recipientes llenos con tapas limpias, secas y bien ajustadas. Cualquier material derramado debe limpiarse con un paño limpio y seco, nunca con un paño impregnado o humedecido con solvente.
- Etiquetar claramente todos los recipientes para garantizar la identificación adecuada de la muestra. Las tapas también deben etiquetarse, ya que al retirarlas será necesario volver a emparejarlas con su recipiente original. Las etiquetas externas deben utilizarse solo cuando no exista riesgo de que se pierdan durante el transporte.

Cuando el ligante asfáltico se descarga desde un vehículo cisterna hacia un tanque de almacenamiento, es fundamental asegurarse de que el tanque esté limpio o que no contenga material que pueda contaminar el ligante que se está bombeando. Si el tanque está vacío al momento de la descarga, debe verificarse que no se haya acumulado agua en el fondo.

Si se carga ligante asfáltico sobre una emulsión asfáltica o sobre una capa de agua dentro del tanque, puede producirse una espuma violenta del ligante, lo cual representa un serio riesgo de seguridad. Es importante reconocer que cierta cantidad de ligante asfáltico puede permanecer en el fondo de un tanque que aparentemente está "vacío". Por lo tanto, cargar un ligante de un tipo o grado diferente en un tanque que previamente contuvo otro tipo o grado puede alterar las propiedades del ligante, al punto de que ya no cumpla con las especificaciones. Mantener una buena comunicación con el proveedor de ligante asfáltico es un paso fundamental para asegurar que se establezcan procedimientos adecuados de temperatura, almacenamiento y seguridad.

Cuando el ligante asfáltico se descarga desde un vehículo de transporte hacia un tanque de almacenamiento, es esencial garantizar que el tanque esté limpio o que no contenga materiales que puedan contaminar el ligante que se está bombeando hacia su interior.

4.2.1.4 Temperaturas del ligante y la mezcla

Tanto el ligante asfáltico como los agregados deben ser calentados antes de mezclarse: el ligante, para que adquiera la fluidez necesaria que permita bombearlo y recubrir adecuadamente las partículas de agregado; los agregados, para que estén secos y lo suficientemente calientes para recibir el ligante asfáltico y así producir una mezcla bien recubierta, a la temperatura deseada y libre de humedad.

La temperatura del agregado es la que controla la temperatura final de la mezcla.
Por lo general, la temperatura de mezclado se especifica con base en las características del ligante asfáltico y en factores relacionados con las condiciones de mezclado, extendido y compactación.

El mezclado debe realizarse a la temperatura más baja posible que asegure un secado completo del agregado, un recubrimiento adecuado de sus partículas y una mezcla con trabajabilidad satisfactoria. Cuando sea posible, deben utilizarse las recomendaciones de temperatura de mezclado proporcionadas por el proveedor del ligante y de los aditivos. Dos ligantes asfálticos con el mismo grado mismo grado PG pueden requerir temperaturas óptimas de mezclado distintas, especialmente si han sido producidos mediante procesos diferentes. Con mayor razón tendrán temperaturas diferentes si uno es modificado y el otro no, o si se emplean aditivos para mezclas tibias (WMA). Se recomienda el siguiente procedimiento para seleccionar el punto de partida de las temperaturas de mezclado en planta:

El mezclado debe realizarse a la temperatura más baja posible que asegure un secado completado del agregado, un recubrimiento adecuado de sus partículas y una mezcla con trabajabilidad satisfactoria.

1. Seleccionar la temperatura de mezclado en planta con base en: las recomendaciones del proveedor del ligante, la experiencia previa con el mismo grado de ligante proveniente de ese proveedor, y las condiciones del proyecto (incluyendo clima y época del año, espesor de la capa, distancia de acarreo y consideraciones propias de la mezcla).

2. En ausencia de recomendaciones del proveedor, consultar la Tabla 4, donde se presentan las temperaturas recomendadas de mezclado en planta según el grado del ligante.
3. En general, al usar la tabla, se debe emplear el valor medio del rango de temperaturas como punto de partida para el ligante PG seleccionado.
    - Típicamente, las temperaturas de mezclado en planta varían entre 265 y 300 °F (130 a 150 °C) para mezclas densas estándar que usan ligantes limpios (no modificados).
4. No permitir que la temperatura de mezclado en planta exceda los 350 °F (180 °C) para evitar un envejecimiento excesivo del ligante asfáltico.
5. Tener precaución al aumentar demasiado la temperatura de mezclado para mejorar el extendido y la compactación en obra. Temperaturas excesivas pueden generar consecuencias negativas:
    - El ligante asfáltico puede dañarse.
    - Se pueden generar humos y olores innecesarios.
    - Puede ocurrir drenado del ligante en ciertos tipos de mezcla.
    - La mezcla puede volverse frágil o inestable bajo el equipo de compactación.
    - Se añaden costos y emisiones innecesarios.

Table 4. Temperaturas típicas de almacenamiento y mezclado de ligante en planta

TEMPERATURAS TÍPICAS DEL LIGANTE ASGÁLTICO				
Grado del Ligante (PG)	Temperatura de Almacenamiento en el Tanque de la Planta HMA (°F)		Temperatura de Mezclado en la Planta HMA (°F)	
	Rango	Punto medio	Rango	Punto medio
PG 46–28	260–290	275	240–295	264
PG 46–34	260–290	275	240–295	264
PG 46–40	260–290	275	240–295	264
PG 52–28	260–295	278	240–300	270
PG 52–34	260–295	278	240–300	270
PG 52–40	260–295	278	240–300	270
PG 52–46	260–295	278	240–300	270
PG 58–22	280–305	292	260–310	285
PG 58–28	280–305	292	260–310	285
PG 58–34	280–305	292	260–310	285
PG 64–22	285–315	300	265–320	292
PG 64–28	285–315	300	265–320	292
PG 64–34	285–315	300	265–320	292
PG 67–22	295–320	308	275–325	300
PG 70–22	300–325	312	280–330	305
PG 70–28	295–320	308	275–325	300
PG 76–22	315–330	322	285–335	310
PG 76–28	310–325	318	280–330	305
PG 82–22	315–335	325	290–340	315

Fuente: Instituto de Asfalto

4.2.2 Agregado

Las técnicas de acopio y manejo de materiales pétreos son las mismas independientemente del tipo de planta utilizada. Es importante comprender que las propiedades individuales de cada

acopio de agregado —incluyendo su calidad y granulometría— solo pueden garantizarse durante la producción del agregado, no en la planta de mezclado asfáltico.

4.2.2.1 Ensayos y Certificación

Los datos de las propiedades de los agregados deben registrarse a medida que los materiales llegan a la planta. Si el material no ha sido ensayado previamente, o si se han producido cambios debido al manejo, se deben obtener muestras aleatorias suficientes y ensayarlas para asegurar que cumplen todas las especificaciones una vez finalizado el transporte del agregado. Como mínimo, se deben disponer de ensayos de granulometría (análisis por tamizado lavado) para todos los materiales pétreos. Se recomienda que todas las propiedades de los agregados especificadas en el contrato o en los planos sean realizadas o verificadas durante la producción y entrega del agregado, tal como se explica en el Capítulo 3.

4.2.2.2 Almacenamiento y Manejo

Los agregados deben manejarse y almacenarse de manera que: se evite la contaminación, se minimice la degradación, y se prevenga la segregación. El área destinada al acopio debe ser limpia y estable para evitar contaminación. Los materiales deben acumularse sobre un terreno bien drenado, para evitar la acumulación de humedad.

La planificación del sitio es fundamental al construir los acopios en la planta.
Es necesario controlar el drenaje superficial para evitar que los cargadores frontales o los camiones que abastecen la planta contaminen el agregado. En plantas ubicadas en zonas bajas, puede ser necesario construir una plataforma de trabajo bien drenada para asegurar que los agregados se manipulen sin adulteración.

En plantas permanentes, pavimentar el área de acopio ayuda a prevenir la contaminación desde la subrasante y acelera el drenaje de humedad de los acopios. Además, almacenar los agregados, especialmente RAP, bajo techo es una opción cada vez más rentable para reducir el exceso de humedad. Un contenido de humedad consistentemente bajo reduce los costos de calentamiento y secado, a la vez que mejora la productividad de la planta y la uniformidad de la mezcla.

Para evitar la mezcla no deseada y la contaminación cruzada entre distintos agregados, las áreas de acopio deben tener suficiente espacio para mantener los acopios claramente separados, o deben utilizar tabiques como divisores verticales para mantener la separación. Cuando se utilicen tabiques, se debe evitar que los acopios rebalsen y caigan sobre materiales adyacentes.

4.2.2.3 Formación de Acopios y Segregación

Una de las principales preocupaciones en el manejo y acopio de agregados es la segregación.
El método utilizado para controlar la segregación depende de la naturaleza del material. Los agregados bien graduados, que contienen partículas desde el tamaño máximo nominal (NMAS) hasta las más finas, son los más propensos a segregarse. En cambio, materiales como arena, agregado fino triturado, o cualquier agregado de tamaño único, generalmente pueden manejarse y acopiarse con poca o ninguna segregación.

Cuando un agregado bien graduado —que contiene partículas gruesas y finas— se deposita formando un acopio con lados inclinados (en forma de cono), la segregación es inevitable, ya que las partículas más gruesas ruedan hacia la base del talud. La segregación en los acopios puede reducirse casi por completo utilizando múltiples acopios fraccionados (según tamaños). Construir el acopio en capas sucesivas también ayuda a minimizar este tipo de segregación.

Empujar el agregado o lanzarlo hacia abajo desde la parte superior del acopio produce segregación. El uso de maquinaria sobre el acopio, especialmente equipos con orugas de acero deben minimizarse para evitar rotura del agregado, generación de finos y degradación.

El uso de transportadores radiales permite acopiar más material en un área más pequeña al elevar progresivamente la altura del acopio. El uso adecuado de un stacker radial incluye elevar lentamente el transportador después de moverlo horizontalmente, que el acopio crezca de forma vertical, reduciendo la segregación. La segregación puede ocurrir si al apilar se le permite dejar caer el agregado desde demasiada altura.

La segregación en los acopios puede reducirse casi por completo utilizando múltiples montones fraccionados de material.

Figura 23 Muestra la capacidad de un transportador radial telescópico que es muy eficaz para eliminar la segregación de los acopios.

Fuente: Masaba, Inc.

Figura 23. Transportador telescópico Magnum formando un acopio en tongadas.

4.2.3 Aditivos

Las mezclas asfálticas tradicionales, compuestas únicamente por ligante asfáltico sin modificar y áridos vírgenes, son cada vez menos comunes. La mayoría de las mezclas asfálticas modernas contienen modificadores o aditivos de algún tipo. El pavimento asfáltico reciclado y el ligante asfáltico modificado se han utilizado durante muchos años y se incorporan regularmente con un impacto mínimo en los procesos de la planta. Muchos otros aditivos utilizados para mejorar el rendimiento de la mezcla requieren especial atención. Algunos aditivos, como el antiadherente líquido y el aditivo WMA, suelen incorporarse al suministro de ligante asfáltico, ya sea en la terminal de ligante asfáltico o mediante inyección en la planta. Los aditivos añadidos en la terminal de asfalto suelen estar certificados por el proveedor del ligante y no requieren adaptaciones especiales en la planta de asfalto.

Los aditivos que se incorporan en la planta de asfalto deben dosificarse con precisión e incorporarse al producto final. Estos aditivos pueden incluir LAS, cal hidratada, WMA, modificador de caucho granulado, relleno mineral, fibras, RAP, RAS y muchos otros productos. Todos estos materiales influirán en el rendimiento de la mezcla asfáltica producida y deben dosificarse con precisión en la planta para lograr el rendimiento deseado. Los especificadores y los proveedores de aditivos deben colaborar para garantizar que los materiales respectivos se reciban, almacenen e incorporen a la mezcla según sea necesario para lograr los resultados previstos. Se recomienda a los productores de mezclas asfálticas que consulten las recomendaciones del fabricante de aditivos al utilizar cualquier producto especializado. Consulte el Capítulo 3 para obtener más información sobre los materiales aditivos.

4.3 ALIMENTACIÓN EN FRÍO DEL AGREGADO

Los sistemas de alimentación en frío de las plantas discontinuas y de las plantas de flujo continuo tipo tambor son similares. Cada sistema está compuesto por: tolvas de alimentación en frío, correas alimentadoras, una correa colectora, y una correa de carga. El sistema de alimentación en frío recibe los agregados desde los acopios, los proporciona para lograr la granulometría especificada, y los entrega al secador. En la mayoría de las plantas, el sistema incluye una zaranda de protección en algún punto del proceso.

Cuando se introduce RAP en la planta, se requieren tolvas adicionales, una banda alimentadora, una correa colectora, una zaranda de protección y una banda de carga independientes para manejar este material extra.

4.3.1 Tolvas de Alimentación en Frío

El flujo de agregados a través de la planta comienza en las tolvas de alimentación en frío (ver Figura 24). La planta está equipada con múltiples tolvas para manejar los diferentes tamaños de agregados utilizados en la mezcla. Debe instalarse un tabique o divisor entre cada tolva de alimentación en frío para evitar el desbordamiento de agregado de una tolva hacia otra. Si ocurre desbordamiento, los materiales se mezclan indebidamente, lo que puede alterar significativamente la granulometría de la mezcla y afectar el desempeño del producto final.

Un flujo uniforme de agregados con tamaños adecuados es crucial para lograr una producción consistente. Una vez que un material pétreo es introducido en los compartimentos de alimentación en frío, la planta no puede detectar ni corregir inconsistencias en la gradación o en la calidad del agregado.

Fuente: Asphalt Institute

Figura 24. Carga de agregados en los compartimentos de alimentación en frío

4.3.2 Alimentadores de Tolvas

Los agregados son entregados a través de compuertas calibradas hacia los alimentadores de banda (correas cortas de velocidad variable) ubicados directamente debajo de cada compartimento de alimentación en frío (ver Figuras 25 y 26). La tasa de material proveniente de cada compartimento es controlada por la velocidad de la banda del alimentador y por la apertura de la compuerta. Este sistema proporciona un control muy consistente del flujo de agregados desde los compartimentos individuales hacia la banda transportadora principal que conduce al secador.

Fuente: Asphalt Institute

Figura 25. Banda alimentadora de la tolva de alimentación en frío

Cada abertura del compartimento de alimentación en frío normalmente está equipada con un sensor de flujo (ver Figura 26) colocado directamente en la corriente de material. Si un compartimento se queda vacío o si la abertura de descarga se obstruye, una alerta de 'condición sin flujo' se envía al computador de la planta.

Fuente: Asphalt Institute

Figura 26. Sensor de agregado de la tolva de alimentación

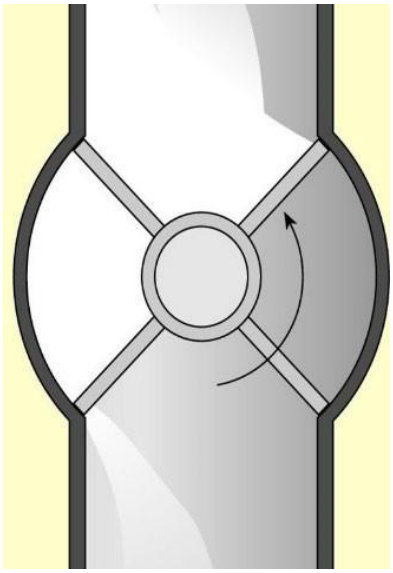
Debido a que un flujo uniforme de agregados con tamaños adecuados es tan importante para una producción consistente, se debe realizar una verificación antes y durante la producción para asegurarse de que el sistema de alimentación esté funcionando correctamente. Las siguientes condiciones son importantes para mantener un flujo uniforme y consistente:

- Tamaños correctos de los agregados en los acopios y en las tolvas frías.
- No debe existir segregación en los acopios de agregados.
- Compuertas de alimentación calibradas y aseguradas con precisión.
- No debe haber obstrucciones en las compuertas de alimentación ni en las tolvas frías.
- No debe haber aglomeraciones de material que causen "puentes" que interrumpan el flujo uniforme.
- Vibradores de tolva funcionando correctamente, si están instalados, para prevenir la formación de puentes.
- Ajustes correctos de control de velocidad.

4.3.3 Sistema de Aditivo de Relleno Mineral/Cal Hidratada

Materiales extremadamente finos, generalmente denominados como "polvo" (tamiz menor a 0.075 mm), fracción de la gradación de los agregados, son un componente crítico en cualquier mezcla asfáltica durable.

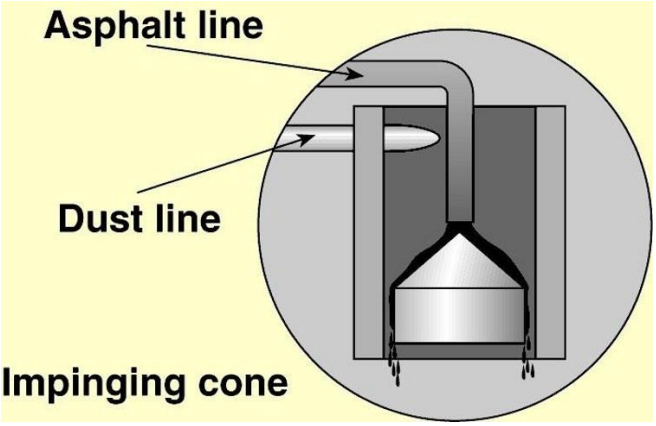
El relleno mineral, como la cal hidratada, cemento Portland, ceniza volante, polvo de piedra caliza o finos del colector de mangas, debe almacenarse en un silo u otro contenedor adecuado y ser entregado a la planta mediante un sistema de alimentación por paletas (ver Figura 27) o una tolva pequeña de pesaje. La velocidad del alimentador está calibrada según el agregado que se está entregando al tambor. El silo normalmente está equipado con un sistema de aireación para evitar que el relleno mineral se compacte formando una masa densa y bloquee la abertura del alimentador. Si el flujo del relleno es restringido, el alimentador de paletas seguirá girando, pero no enviará material a la planta.



Fuente: Asphalt Institute

Figura 27. Esquema del alimentador de paletas

Una vez dosificado, se utiliza un sistema neumático o un tornillo sinfín para mover el material hacia la ubicación requerida. En un mezclador de tambor, este sistema suele ubicarse cerca de la línea de suministro del ligante dentro del tambor. Esta proximidad permite que el ligante líquido capture el material extremadamente fino, evitando que sea desviado nuevamente hacia el sistema de recolección de polvo. Terminar ambas líneas de suministro bajo una campana o caperuza de impacto (ver Figura 28) proporcionará protección adicional al separar el material fino de la corriente de aire de alta velocidad que fluye a través del secador.



Fuente: Asphalt Institute

Figura 28. Campana o cono de impacto del mezclador de tambor

Para dosificar continuamente el polvo, los silos de almacenamiento normalmente utilizan una tolva de pesaje o un módulo para medir con precisión la tasa de material que fluye desde el almacenamiento hacia el proceso de mezclado. Si este método no está disponible, se deben realizar verificaciones frecuentes de la calibración de los mecanismos de alimentación y pesaje.

Algunas agencias requieren el uso de cal hidratada como agente anti-desprendimiento. Existen muchos métodos exitosos que incorporan cal hidratada en una mezcla. Un método común es agregar la cal hidratada directamente al agregado húmedo o combinarla con agua para formar una lechada y luego mezclarla con el agregado en un mezclador tipo pugmill. Generalmente, la mezcla de cal y agregado se alimenta directamente a la planta después del mezclado. Sin embargo, un agregado tratado con una mezcla de lechada de cal puede almacenarse temporalmente para permitir un mayor tiempo de impregnación y secado antes de introducirlo nuevamente en la planta para el mezclado. Para obtener más información sobre el uso de cal hidratada como agente anti-desprendimiento, consulte la Sección 3.6.3.

4.3.4 Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)

El sistema de alimentación en frío para manejar RAP es esencialmente el mismo que el sistema de alimentación en frío convencional para agregados nuevos. En la mayoría de las plantas, como se mostró previamente en la Figura 21 y la Figura 22, se utiliza una tolva de alimentación en frío separada. La tolva (o tolvas) es similar a las tolvas de alimentación en frío usadas para agregados, excepto que los cuatro lados de las tolvas para RAP suelen ser mucho más empinados. Los lados más inclinados reducen la tendencia del material recuperado a formar puentes sobre la abertura en la parte inferior. El RAP debe pasar por una criba de separación para remover cualquier pieza de mezcla asfáltica de gran tamaño o material.

Figura 28. Línea de asfalto, Línea de polvo, Cono de impacto.

Es importante tener en cuenta que las fuentes de RAP deben ser probadas adecuada y aleatoriamente para verificar su consistencia antes de producir la mezcla. Si la consistencia del RAP es variable, usar un porcentaje más alto incrementará la probabilidad de que el producto final esté fuera de especificación Esta es una de las razones por las cuales alguna agencia especificadoras con frecuencia requieren que las fuentes de RAP se almacenen por separado y por qué los porcentajes de RAP a menudo se limitan en el producto final.

Las fuentes de RAP deben ser adecuada y aleatoriamente evaluadas para verificar su consistencia antes de producir la mezcla.

Una manera de reducir la variabilidad del RAP es fraccionarlo en dos tamaños: un material fino y un material grueso.

El tamaño de la malla de separación puede variar entre 9.5 y 19 mm (3/8 a 5/8 de pulgada).

Luego, el material se dosifica en la mezcla como si proviniera de dos fuentes distintas de material. Información adicional sobre el material reciclado está disponible en la Sección 3.3.9.

4.4 SECADO Y CALENTAMIENTO DE LOS AGREGADOS

Desde las tolvas de alimentación en frío, los agregados son enviados al tambor secador. El secador cumple dos funciones: seca el agregado y lo calienta a la temperatura requerida.

4.4.1 Secador de Agregados

El secador es un cilindro inclinado y rotatorio, con un diámetro que varía entre 5 y 10 pies (1.5 a 3 m) y una longitud de 20 a 40 pies (6 a 12 m) (ver Figura 29). Posee un quemador de aceite o gas con un ventilador soplador que proporciona el aire primario para la combustión del combustible. El ventilador de extracción es un elemento crítico que succiona los gases calientes a través del secador y ayuda a completar la combustión del combustible del quemador. Este ventilador de extracción está ubicado después del secador, al final del equipo de control de polvo (analizado con más detalle en la Sección 4.7).

Fuente: National Asphalt Pavement Association

Figura 29. Secador típico de una planta por lotes

El revestimiento interior del tambor tiene canales y conductos longitudinales atornillados o soldados, llamados aletas, que levantan el agregado y lo dejan caer en una ducha continua o "velo" a través de los gases calientes que fluyen por el secador (ver Figura 30). La inclinación del secador, su velocidad de rotación, su diámetro y longitud, además de la distribución y número de aletas, se combinan para determinar el tiempo que el agregado permanecerá dentro del secador.

Fuente: Asphalt Institute

Figura 30. Velo uniforme de agregado en el secador

Cerca del área de llama abierta del quemador, también conocida como la zona de combustión, un diseño especial de aletas atrapa el agregado cerca de la pared del secador y lo transporta por encima de la parte superior del tambor.

Esto evita que partículas individuales pasen a través de la llama e interfieran con la combustión completa del combustible. El mantenimiento de las aletas dentro del tambor para producir un velo uniforme de agregados (ver Figura 31) a lo largo del tambor es necesario para producir de manera eficiente una mezcla consistente.

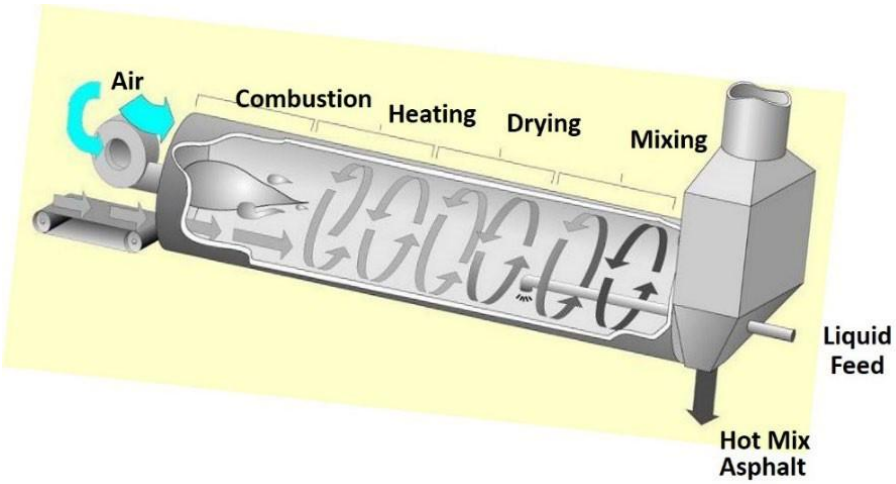
Fuente: Stansteel/Hotmix Parts & Supply

Figura 31. Diferentes tipos de aletas del secador

4.4.1.1 Tipos de Secadores de Agregados

Existen dos tipos básicos de secadores: de flujo paralelo y de flujo contracorriente. Reciben estos nombres por la relación entre el flujo del agregado y el flujo de los gases calientes dentro del secador. Independientemente del tipo de secador, los principios para el secado de agregados son los mismos.

En los secadores de flujo paralelo (ver Figura 32), el agregado y el aire fluyen en la misma dirección. El agregado frío se introduce en el secador por el mismo extremo donde se encuentra el quemador (el extremo más alto del tambor), y los materiales fluyen hacia el extremo inferior del secador en paralelo al flujo de aire.

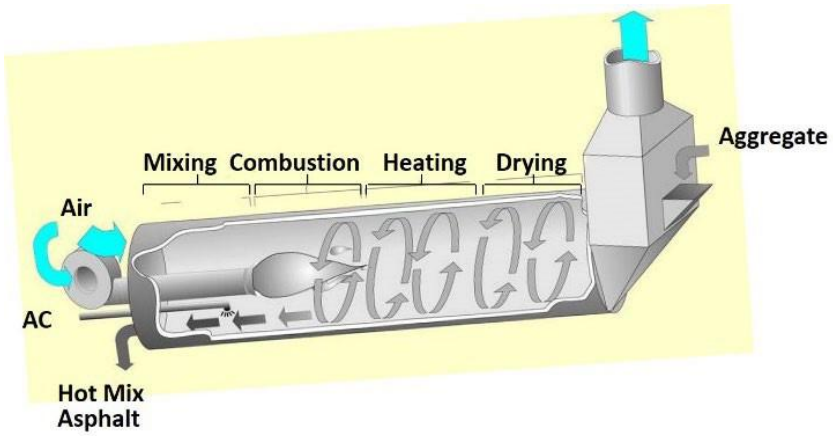


Fuente: IIT Kharagpur

Figura 32. Secador de flujo paralelo

Figura 32. Aire, Combustión, Calentamiento, Secado, Mezclado, Alimentación líquida, Mezcla asfáltica en caliente.

En los secadores de flujo contracorriente (ver Figura 33), el agregado y el aire fluyen en direcciones opuestas, uno en contra del otro. El quemador se encuentra en el extremo inferior del tambor, y el agregado es transportado a través del tambor en dirección contraria al flujo de aire. Los secadores de flujo contracorriente son más comunes porque proporcionan una transferencia de calor más eficiente que los secadores de flujo paralelo.



Fuente: IIT Kharagpur

Figura 33. Secador de flujo contracorriente

4.4.1.2 Capacidad del secador de agregados

El proceso de secado controla la tasa de producción total de toda la planta. La mezcla asfáltica no puede producirse más rápido de lo que el agregado puede secarse y calentarse. Las capacidades de los secadores se clasifican para calentar y secar el agregado a un contenido de humedad específico (típicamente 5%). Si el contenido de humedad del agregado es mayor, la cantidad de agregado alimentado al secador debe reducirse para permitir un secado adecuado. Consecuentemente, existe una disminución en la producción del secador. La pendiente del secador,

Las aletas internas, la temperatura del producto, el tipo de agregado, las condiciones atmosféricas y la elevación también afectarán el rendimiento del secador.

Si el contenido de humedad del agregado es mayor, la cantidad de agregado que se alimenta al secador debe reducirse para que el secado del material sea adecuado.

El contenido de humedad del agregado debe determinarse al menos dos veces al día y con mayor frecuencia si las condiciones de humedad cambian, como después de una lluvia. El contenido promedio de humedad del agregado que ingresa al secador de la planta o al mezclador de tambor es necesario para que el sistema de control de la planta permita ajustar correctamente los controles del quemador, calcular el peso seco del agregado entrante y determinar el suministro de ligante para plantas de mezcla en tambor.

4.5 PLANTAS DE LOTE

Las plantas de lote (mostradas en la Figura 34) reciben su nombre debido a que durante su

Figura 33. Aire, Asfalto caliente, Mezclado, Combustión, Calentamiento, Secado, Agregado.

operación producen mezcla asfáltica en lotes, un lote a la vez, uno después del otro.

El tamaño de un lote varía según la capacidad del pugmill de la planta (la cámara de mezclado donde se combinan el agregado y el ligante asfáltico).

Los tamaños de lote pueden variar desde 2,000 hasta 10,000 libras (900 a 4,500 kg).

Fuente: Gencor Industries

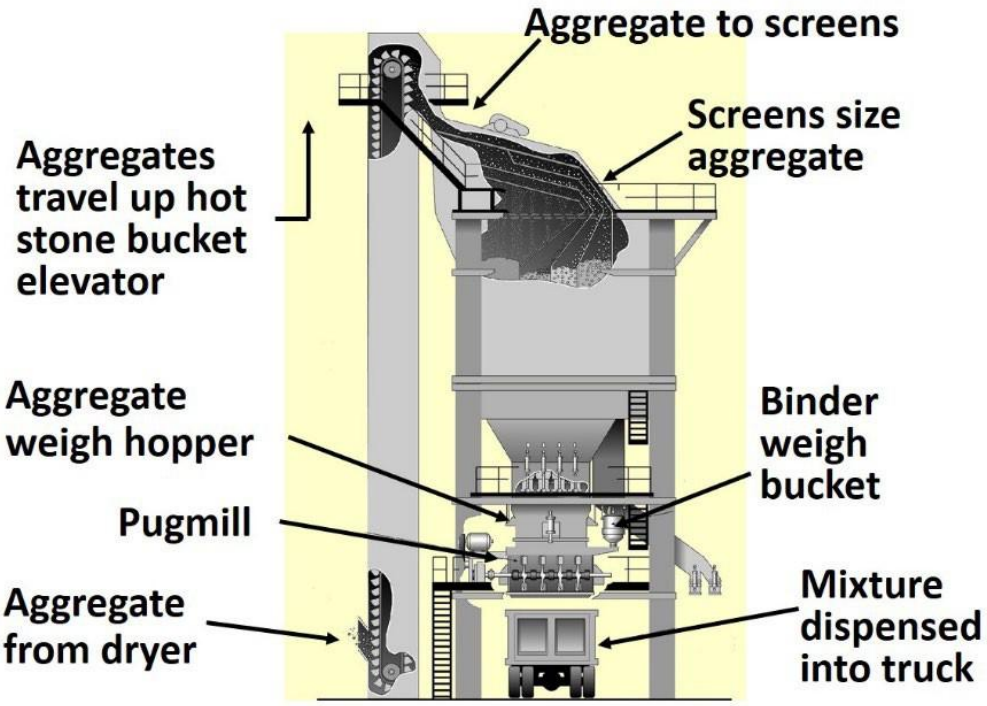
Figura 34. Planta de mezcla asfáltica tipo batch

4.5.1 Operaciones

Como se mencionó anteriormente, las operaciones básicas de las plantas tipo batch y de las plantas de mezcla en tambor son similares, excepto en los procedimientos de mezcla del agregado y del ligante asfáltico. El almacenamiento y manejo de materiales, las alimentaciones en frío de los agregados, y el calentamiento y secado del agregado, así como el control de emisiones, son bastante similares para plantas batch y plantas drum-mix. Esta sección se centrará en las operaciones de mezclado que son exclusivas de una planta tipo batch.

4.5.2 Clasificación y Almacenamiento del Agregado Caliente

Después de que el agregado ha sido calentado y secado, sale del secador hacia un elevador caliente. El elevador caliente es un transportador de cangilones casi vertical y cerrado, que lleva el agregado hasta la parte superior de la "torre de dosificación" (ver Figura 35). El agregado se descarga desde el elevador hacia una unidad de cribado. El agregado caliente pasa sobre una unidad de cribado que lo separa en fracciones de distintos tamaños y deposita estas fracciones en tolvas calientes.

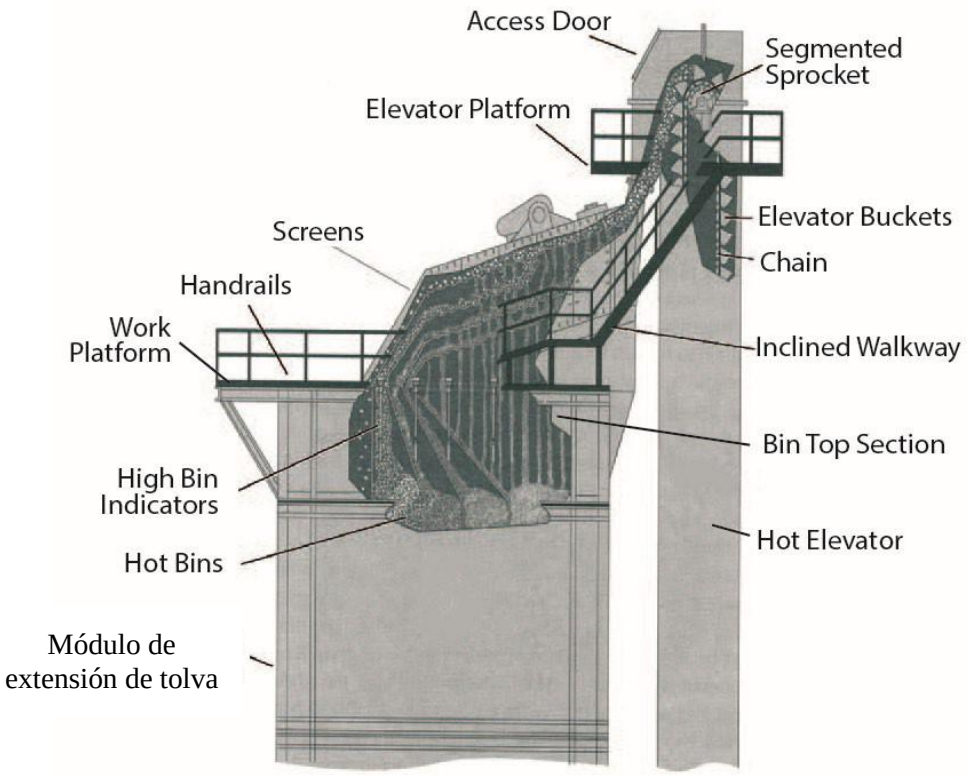


Fuente: Asphalt Institute

Figura 35. Torre de dosificación

La unidad de cribado incluye un conjunto de varias pantallas vibratorias de diferentes tamaños dentro de una gran carcasa. Las pantallas separan el agregado en tamaños específicos. La primera pantalla es una pantalla de desbaste que elimina el agregado de tamaño excesivo. A esta le siguen de dos a cuatro pantallas adicionales, que disminuyen en tamaño de arriba hacia abajo. Los tamaños de las pantallas utilizadas dependerán de la planta y de la gradación del agregado para la mezcla que se está produciendo (ver Figura 36). Las pantallas están diseñadas para permitir: que las partículas más finas caigan completamente hasta la primera tolva caliente, y que las partículas más grandes avancen sobre las pantallas para ser depositadas en las tolvas siguientes.

Figura 35. Agregado hacia los tamices, Agregados ascienden por el elevador de cangilones de áridos calientes, Agregado clasificado por tamaño en los tamices, Tolva de pesaje de agregados, Mezcladora pugmill, Agregado proveniente del secador, Cubo de pesaje del ligante, Mezcla descargada en el camión.



Fuente: Asphalt Institute

Figura 36. Plataformas de cribado y tolvas calientes

4.5.3 Tolvas Calientes

Las tolvas calientes están ubicadas directamente debajo de la unidad de cribado y se utilizan para almacenar los agregados calentados y clasificados. Las tolvas calientes tienen indicadores que señalan cuando el nivel de agregados cae por debajo de un cierto punto. Estos indicadores pueden ser electrónicos o mecánicos. Cada tolva también debe estar equipada con: una tubería de desbordamiento, o un indicador de tolva llena, para evitar que cantidades excesivas de agregado se derramen hacia otras tolvas. Cuando una tolva se sobrellena severamente, la criba superior se inclina sobre el agregado acumulado, lo que puede causar exceso de carga y un posible daño a la pantalla.

Las tolvas calientes se clasifican según su capacidad total. Esta capacidad puede ser tan baja como 20 toneladas en una planta de lotes pequeña y portátil, o tan alta como 300 toneladas en una planta grande y estacionaria. Una capacidad muy común está en el rango de 40 a 80 toneladas (36 a 72 toneladas métricas).

No todo el agregado pasa por la plataforma de cribado y las tolvas calientes. El relleno mineral y el polvo que regresa del sistema de filtración se alimentan directamente a la tolva de pesaje y se pesan como un componente separado.

Figura 36. Puerta de acceso, Plataforma del elevador, Rueda dentada segmentada, Cangilones del elevador, Cadena, Pasarela inclinada, Sección superior de la tolva, Elevador de áridos calientes, Módulo de extensión de tolva, Tolvas calientes, Indicadores de nivel alto de tolva, Plataforma de trabajo, Barandales, Cribas

Fuente: National Asphalt Pavement Association

Figura 41. Sala de Control de una Planta de Lotes

4.5.10 Reciclaje con una planta por lotes

Todos los métodos de reciclaje en plantas por lotes utilizan transferencia de calor por conducción en lugar de transferencia de calor por convección. La transferencia de calor por conducción se logra mezclando material reciclado frío con agregado caliente. La transferencia de calor por convección se logra exponiendo el agregado frío a gases calientes. En las plantas por lotes, independientemente del método de reciclaje utilizado, se emplea agregado virgen sobrecalentado y caliente para calentar el RAP frío y húmedo. A continuación, se presenta una breve discusión de los métodos comunes de reciclaje y transferencia de calor en plantas por lotes.

4.5.10.1 Técnica de reciclaje con caja de pesaje

Con el método de reciclaje con caja de pesaje, el RAP frío (no calentado) y húmedo se añade a la tolva de pesaje, donde el controlador de la mezcla lo pesa como un material agregado adicional. El contenedor de alimentación para el RAP y el transportador elevado que se requiere para llegar a la tolva de pesaje suelen tener motores grandes y embragues neumáticos con frenos, de modo que pueden arrancarse y detenerse instantáneamente. Esto facilita alimentar justo la cantidad adecuada de RAP en la caja de pesaje.

El RAP se mezcla luego con los agregados vírgenes sobrecalentados en la tolva de pesaje. La transferencia de calor por conducción ocurre en la tolva de pesaje y en el molino mezclador durante toda la etapa de mezcla en seco. Durante el proceso de transferencia de calor, la humedad en el RAP genera una cantidad significativa de vapor.

El área del molino mezclador y la tolva de pesaje debe estar cerrada y ventilada hacia el sistema de control de emisiones para controlar este volumen instantáneamente grande de vapor y polvo.

Si bien teóricamente se pueden producir mezclas recicladas con un contenido de hasta el 50 por ciento de RAP con este método, en las condiciones prácticas diarias de campo es raro ver porcentajes de RAP superiores al 25 por ciento con el método de transferencia de calor con caja de pesaje. Esto se debe a que los contenidos de humedad del RAP típicamente se sitúan en el rango del 3 al 5 por ciento, y elevar la temperatura del agregado por encima de 600 °F (315 °C) es difícil debido a las limitaciones del secador. Además, las temperaturas del gas de salida del secador pueden imponer un límite práctico si se utilizan casas de bolsas en la planta. La tela filtrante utilizada en las bolsas de la casa de bolsas tiene limitaciones de temperatura, y se requiere un enorme aumento en el consumo de combustible para obtener la temperatura de agregado requerida.

4.5.10.2 Técnica de reciclaje en mezclador de paletas con tolva de pesaje de RAP separada

Este método de reciclaje utiliza una tolva de pesaje separada para el RAP, la cual vacía su componente del lote en el mezclador de paletas. Por lo general, se utiliza un transportador de lanzamiento de alta velocidad para transportar el RAP desde la tolva de pesaje de RAP hasta el molino mezclador, aunque también se puede usar un canal o un transportador de tornillo de alta velocidad. El mismo proceso de transferencia de calor, liberación de vapor y límites prácticos se aplica a este enfoque, tal como ocurre con el método de caja de pesaje en las plantas por lotes. Al agregar una tolva de pesaje adicional a la instalación de producción por lotes, el RAP se transporta y se pesa en su propia tolva mientras el ligante asfáltico virgen y los agregados vírgenes se pesan por separado, lo cual reduce ligeramente el tiempo de dosificación.

4.5.10.3 Técnica de reciclaje con elevador de cangilones

Este enfoque de reciclaje en plantas por lotes elimina la liberación de vapor típica de los métodos de transferencia de calor en el mezclador y el mezclador de paletas. En el método de reciclaje con elevador de cangilones, el RAP frío y húmedo se mezcla con el agregado virgen sobrecalentado a medida que el agregado sale del secador y entra al elevador de cangilones.

La liberación continua de vapor resultante de la transferencia de calor por conducción ocurre en los cangilones mientras la mezcla de agregado virgen y RAP avanza hacia la plataforma de cribado. El vapor liberado por el RAP es extraído por el sistema de conductos para polvo fugitivo ya instalado en el elevador de cangilones y la plataforma de cribado.

Debido a que el RAP se mezcla continuamente con el agregado virgen, se utilizan básculas de cinta tanto en el transportador que alimenta el agregado virgen al secador como en el transportador que alimenta el RAP al elevador de cangilones. Las básculas aseguran el mantenimiento de una proporción adecuada de RAP respecto al agregado virgen.

El control de gradación para la producción de la mezcla se logra de las dos maneras, y ambas son diferentes a las de una instalación por lotes que produce mezclas completamente vírgenes. En el primer método, el RAP y el agregado virgen se criban juntos en la plataforma de cribado, y la mezcla compuesta se separa en los diferentes depósitos calientes en la torre. Cada depósito caliente se analiza para determinar en contenido de ligante asfáltico y la gradación. El contenido de ligante del material debe

determinarse en cada depósito caliente. Luego, deben evaluarse las gradaciones de las muestras de los depósitos calientes y calcularse los porcentajes individuales de cada depósito caliente con base en las gradaciones recuperadas de cada contenedor de suministro. El contenido de ligante asfáltico recuperado del RAP se determina con base en los resultados de la extracción, y se establece el requerimiento de nuevo ligante líquido para cada lote. Debe asumirse que el RAP es consistente no solo en la gradación de piedra recuperada, sino también en el contenido de ligante asfáltico y en el tamaño de partícula del propio RAP.

Este enfoque de producción de mezcla es más difícil que con un método de inyección mediante caja de pesaje o mezclador de paletas; por lo tanto, frecuentemente se utiliza un segundo método que emplea una derivación de cribado. Con este método, el único control de gradación se realiza en los contenedores de alimentación en frío que alimentan el secador, igual que en las plantas de estilo de mezcla en tambor. La mezcla de agregado virgen y RAP se almacena en un solo depósito caliente en la torre y luego se pesa como una mezcla premezclada en la tolva de pesaje de agregados. La mezcla se desvía hacia un solo depósito, típicamente el depósito número 1, utilizando un canal desde el elevador caliente para evitar la plataforma de cribado.

Muchas agencias permiten este tipo de enfoque, pero generalmente también requieren alimentadores de banda con accionamientos de velocidad variable, indicadores de velocidad y control total y proporcional sobre cada contenedor de alimentación. Este es el mismo requisito genérico utilizado para el control de gradación de alimentadores en plantas de mezclador de tambor. Debido a que el viaje por el elevador es relativamente corto en duración, y porque el RAP debe estar seco antes de pasar por las cribas (o almacenarse en el depósito combinado de RAP/agregado), los porcentajes de RAP rara vez superan el 20 por ciento con este enfoque.

4.5.10.4 Introducción de RAP en la cámara de transferencia de calor o en el secador

Este enfoque es esencialmente el mismo que el método estándar de elevador de cangilones, pero el RAP se añade al área de combustión del secador y se protege de la llama mediante una cubierta o extendiendo el tubo del quemador. Otra diferencia es que la liberación de vapor también comienza en la carcasa del secador. Una ventaja de este proceso es que el agregado virgen y el RAP ya están combinados cuando salen del secador y entran al elevador.
Se pueden lograr porcentajes más altos de RAP (25 a 35 por ciento es lo típico) que con los métodos estándar de elevador de cangilones, porque el RAP tiene un período más largo para que la transferencia de calor se complete. Todos los demás aspectos del método estándar de elevador de cangilones se aplican a este enfoque de reciclaje.

4.6 PLANTAS DE TAMBOR Y PLANTAS CONTINUAS.

Ver video:
Producción en una planta de mezcla en tambor.

La mezcla en tambor simplifica el proceso de
necesidad de varios componentes mecánicos importantes en comparación con las plantas de tipo discontinuo. En cuanto a la operación, la principal diferencia entre las plantas de mezcla en tambor y las plantas por lotes es que, en las de tambor, el agregado no solo se seca y se calienta dentro del tambor, sino que también se mezcla de manera continua con el ligante asfáltico.

4.6.1 Operaciones

El tambor mezclador, o drum mixer, es el componente que da nombre a este tipo de planta. Debido a que en una planta de mezcla en tambor no existen cribas de graduación, tolvas calientes, tolvas de pesado ni mezclador de paletas, la graduación del agregado es controlada totalmente por los sistemas de alimentación en frío del agregado, RAP y del polvo mineral.

4.6.2 Operaciones y Componentes de la Planta de Mezcla en Tambor

Los componentes de la planta de mezcla en tambor se muestran en la Figura 42.

Fuente: Astec Industries

Figura 42. Distribución típica de un tambor mezclador

Los agregados individuales se depositan en las tolvas de alimentación en frío, desde donde se dosifican de manera individual según las proporciones de diseño hacia una banda transportadora de alimentación en frío. Un sistema automático de pesaje de agregados monitorea la cantidad de material que ingresa al tambor mezclador. Este sistema de pesaje está interconectado con los controles de la bomba de almacenamiento del ligante asfáltico y con un sistema de dosificación continua, que extrae el ligante desde un tanque de almacenamiento y lo introduce en el tambor. Mientras el tambor rota, el ligante asfáltico y los agregados se mezclan completamente. Un sistema de recolección de polvo captura el exceso de partículas que escapan del tambor y de la cámara de mezclado. Desde el tambor, la mezcla es elevada mediante un transportador metálico de tablillas hasta la parte superior de una tolva de almacenamiento temporal o silo de almacenamiento, donde permanece hasta ser cargada en un camión, como se describe en la Sección 4.9.

4.6.3 Alimentación de Agregados

En una planta de mezcla en tambor, la gradación y la uniformidad de la mezcla dependen principalmente del sistema de alimentación en frío. Por lo tanto, es esencial que el agregado esté correctamente proporcionado antes de su entrada al secador/tambor mezclador. La forma más eficiente de lograr esto es mediante un sistema de alimentación en frío con múltiples tolvas, equipado con alimentadores de banda de precisión para el control de cada tipo de agregado.

Debajo de cada tolva hay un alimentador de banda de velocidad variable, que deposita el agregado medido sobre una banda colectora principal que corre bajo todas las tolvas de alimentación en frío. La banda colectora transporta luego el material agregado proporcionado hacia la banda transportadora principal de alimentación en frío, que lleva el agregado hasta el tambor mezclador.

La mayoría de las bandas transportadoras de alimentación en frío están equipadas con dispositivos que permiten obtener fácilmente muestras representativas del flujo completo de material para la determinación de la gradación o para la calibración. Estos dispositivos se instalan generalmente al final de la banda, justo antes de la entrada al tambor mezclador. Existen dispositivos que pueden instalarse en la banda principal para desviar o recolectar muestras precisas sin detener la banda (ver Figura 43).

Fuente: Asphalt Institute

Figura 43. Dispositivo de Muestreo en Banda Transportadora

Las plantas de mezcla en tambor requieren un sistema de pesaje continuo en la banda transportadora principal de alimentación en frío. A medida que el agregado pasa sobre la báscula, se pesa y se monitorea continuamente mediante el sistema de control de la planta caliente. No se debe desviar ni añadir material a la banda transportadora después de que esta haya pasado por la báscula.

Es importante comprender que el agregado se pesa en la banda antes de secarse. Se debe conocer el contenido total de humedad del material que ingresa a la planta para que la bomba de asfalto pueda dosificar la cantidad correcta de ligante asfáltico.

El contenido de humedad del agregado de alimentación en frío debe verificarse antes de iniciar la operación diaria y nuevamente alrededor del mediodía. Si se cree que el contenido de humedad varía durante el día, se debe revisar con mayor frecuencia. Algunas plantas cuentan con dispositivos de detección de humedad que pueden percibir cambios en el contenido de humedad, los cuales están acoplados al sistema de control que compensa automáticamente dichas variaciones.

4.6.4 Control del Ligante Asfáltico con un Mezclador de Tambor

El control del ligante asfáltico en una operación con tambor mezclador se realiza de manera continua. El ligante asfáltico se mide mediante un medidor calibrado en relación con el flujo de agregado, después de que este ha sido corregido por contenido de humedad y luego combinado con el agregado en el área de mezclado del tambor.

El contenido de ligante asfáltico está interconectado al flujo de agregados. El sistema de monitoreo registra los cambios en el peso del agregado sobre la báscula de la faja y ajusta el flujo de ligante asfáltico para compensar estos cambios.

El ligante asfáltico se mide a través de un medidor calibrado en relación con el flujo de agregados, después de haber sido corregido por el contenido de humedad, y luego se combina con el agregado en el área de mezclado del tambor.

La línea de suministro de ligante funciona continuamente para ponerse a mantenerse al ritmo de la báscula de agregados y entregar la proporción adecuada del ligante en la cámara de mezclado. Para confirmar que la salida del sistema de medición es correcta, se requiere una verificación frecuente de calibración o de su recalibración.

Sacar de operación una planta de mezcla de tambor para realizar una prueba de calibración puede ser muy costoso y consumir mucho tiempo. Los tanques de calibración en línea (ver Figura 44) son una forma eficiente de calibrar los sistemas de medición de asfalto sin el tiempo de inactividad y el riesgo asociado con el uso del método convencional de camión cisterna.

Fuente: ALmix Industries

Figura 45. Tanque estacionario de calibración de ligante asfáltico

4.6.5 Flujo de Agregado

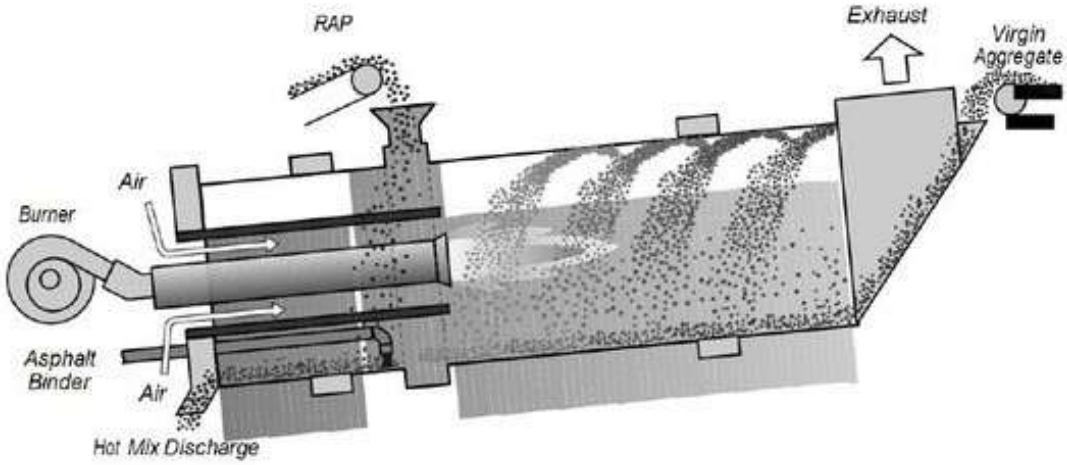
El agregado ingresa a la zona primaria del tambor, donde el quemador lo seca y calienta. Luego, el agregado se desplaza hacia una zona secundaria, donde se añade el ligante asfáltico y ambos son mezclados completamente. La mezcla del ligante asfáltico caliente y la humedad liberada del agregado produce una masa espumosa que atrapa gran parte del material fino (polvo) y recubre las partículas más grandes. Es importante que el agregado dentro del tambor no solo gire con el movimiento rotativo del tambor, sino que también se disperse adecuadamente para lograr un calentamiento y secado rápidos y eficientes de todas las partículas. Los tambores mezcladores están equipados con aletas especialmente diseñadas para crear un "velo" o cortina de agregado en las partes apropiadas del tambor, con el fin de obtener un secado máximo y minimizar las temperaturas de los gases de escape.

4.6.6 Flujo de Ligante

El ligante asfáltico es bombeado desde el tanque de almacenamiento de ligante e ingresa al tambor de mezcla en el punto apropiado de acuerdo con el diseño de la planta. Cuando el ligante asfáltico se añade dentro del tambor, es bombeado hacia el extremo inferior del tambor aproximadamente en la misma ubicación en la que se introducen el relleno mineral y/o los finos del filtro de bolsas de tela. Añadir ligante asfáltico y polvo en estrecha proximidad permite al ligante atrapar una buena porción de los finos y recubrirlos antes de que sean recogidos por la corriente de gases de escape de alta velocidad. Los gases de escape se pasan a través de un sistema de recolección de polvo donde cualquier polvo restante es atrapado y eliminado para cumplir con los requisitos de emisiones, como se discute en la Sección 4.7.

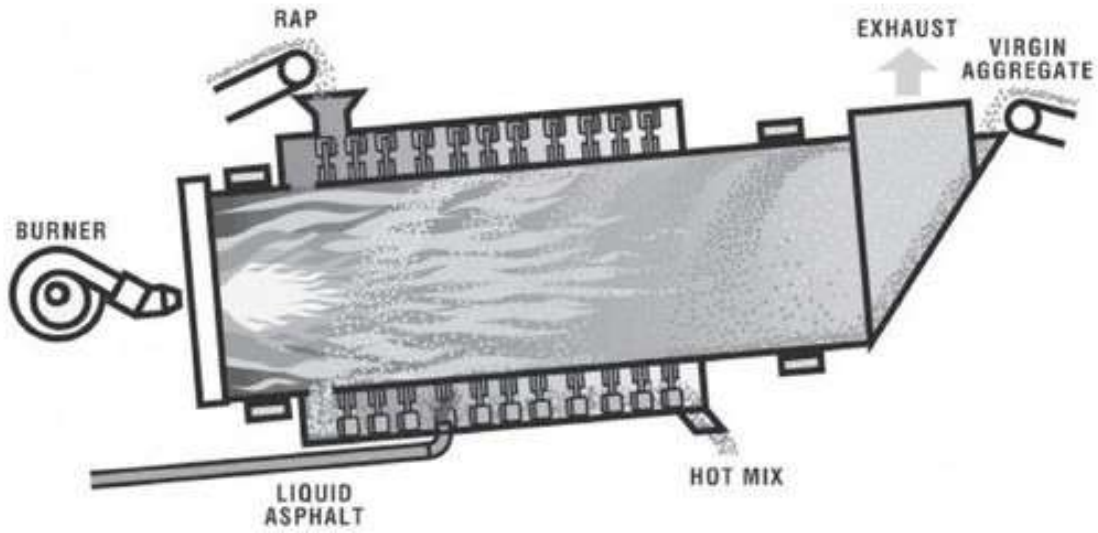
4.6.7 Reciclaje con una Planta de Mezcla de Tambor

La introducción de RAP en una operación de mezcla en tambor es bastante diferente de los métodos utilizados en una planta por lotes. Para minimizar el daño al ligante del RAP y los problemas de control de emisiones, es necesario añadir el RAP mediante un sistema de alimentación dividida. En un sistema de alimentación dividida, el agregado nuevo entra al tambor en una ubicación, y el RAP ingresa al sistema más adelante, donde no está en contacto directo con la llama del quemador. La Figura 45, la Figura 46, y la Figura 47 ilustran puntos típicos de entrada del RAP para varios tipos de plantas de mezcla en tambor.



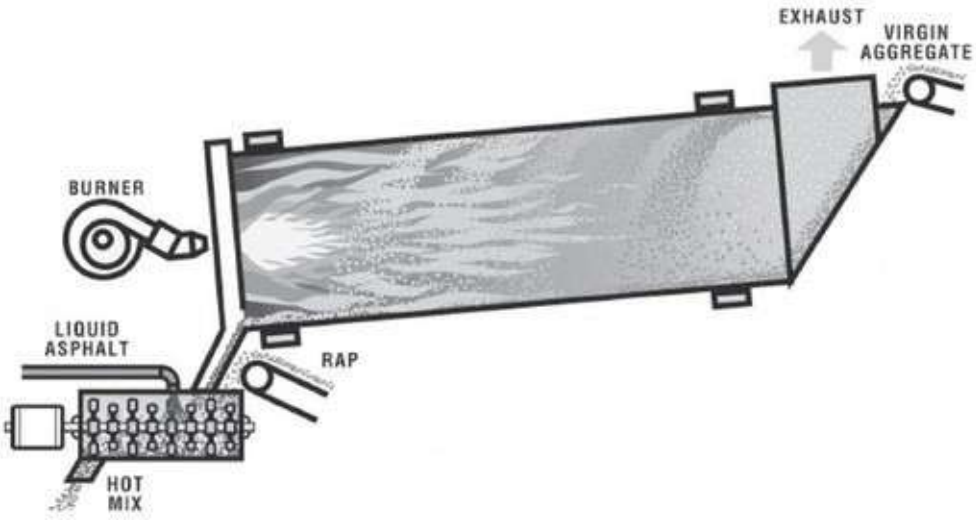
Fuente: Asphalt Institute

Figura 45. Planta de mezcla en tambor de flujo contrario



Fuente: Asphalt Institute

Figura 46. Planta de mezcla en tambor unificada



Fuente: Asphalt Institute

Figura 47. Secador de contraflujo con mezclador continuo separado

Como se mencionó en la Sección 4.5.10 con respecto al RAP en plantas por lotes, un tambor mezclador también requiere agregado virgen sobrecalentado para transferir calor al RAP y eliminar cualquier humedad presente. Estas condiciones pueden presentar obstáculos significativos que pueden limitar la tasa máxima y la cantidad de mezcla con RAP que puede producirse.

Normalmente, si se incorpora un 20 por ciento o menos de RAP en una mezcla reciclada y se utiliza un sistema de alimentación dividida, surgen problemas mínimos de control de emisiones. A medida que el porcentaje de RAP aumenta y el contenido de humedad del RAP se incrementa, existe un mayor potencial para problemas de transferencia de calor y emisiones. Una planta típica de mezcla de tambor requiere condiciones de producción cuidadosamente controladas para incorporar más del 50 por ciento de RAP en una mezcla reciclada sin mayores problemas de emisiones y transferencia de calor.

4.7 SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES

El aire de alta velocidad que fluye a través del secador y que arrastra los gases de escape también elimina pequeñas partículas del tamaño de polvo (menores a 0.075 mm) de la mezcla de agregados. Debido a que este polvo es parte del diseño de la mezcla, debe ser capturado y devuelto a la mezcla que se está produciendo. Eliminar el polvo de la corriente de escape con equipos de control de emisiones de alta eficiencia evita que las emisiones de polvo producidas por la planta excedan los límites locales, estatales y federales de calidad del aire.

4.6.8 Conceptos Básicos de Recolección de Polvo

La cantidad de polvo en suspensión depende del material que se está secando, de la velocidad del aire dentro del secador y de la ubicación del punto de inyección del ligante, donde se capturan las partículas más finas.
El sistema de control de emisiones en la mayoría de las instalaciones de plantas de asfalto generalmente consta de colectores de polvo primarios y secundarios. Los colectores de polvo están situados cuesta abajo del secador y filtran el aire que sale del tambor.

4.6.9 Colectores Primarios

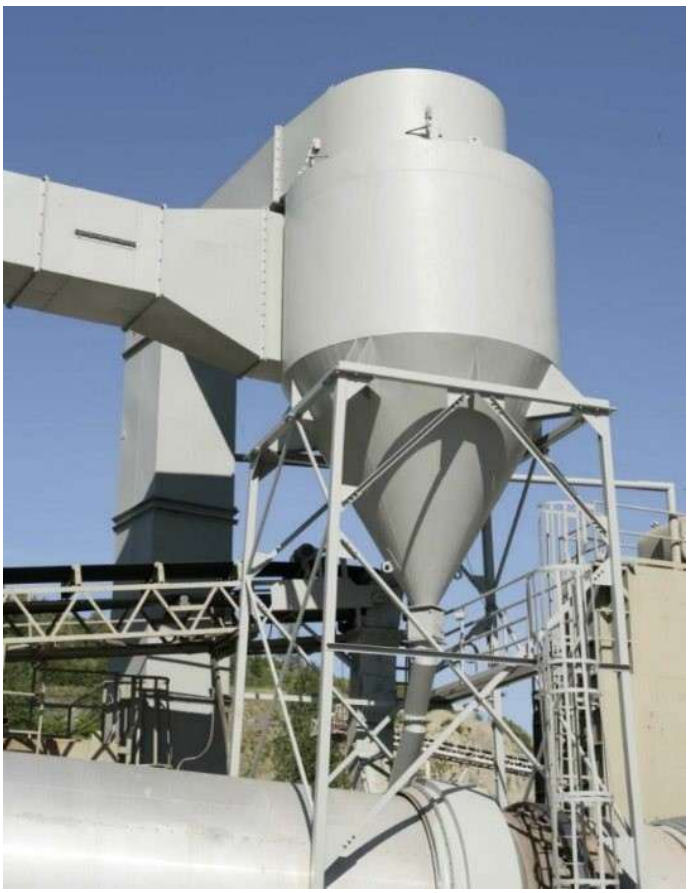
La función del colector primario es recoger y remover las partículas de polvo más grandes contenidas en la corriente de gases de escape. Los colectores primarios típicos son la caja de decantación (knockout box) o el colector ciclónico.

La caja de decantación es el tipo más simple de colector primario (ver Figura 48). El gas de escape fluye a través de una cámara expandida, lo que provoca una disminución en la velocidad del aire. La cámara también contiene placas que generan un cambio en la dirección del flujo de aire. La reducción de la velocidad y los cambios de dirección hacen que las partículas de polvo más grandes se desprendan de la corriente de aire y caigan al fondo de la caja, donde son reintroducidas en el secador.

Fuente: Gencor Industries

Figura 48. Caja de decantación que retorna partículas finas de mayor tamaño al secador

Los colectores ciclónicos son más eficientes que las cajas de decantación y operan según el principio de separación centrífuga. La corriente de gases de escape circula dentro del colector (como se muestra en la Figura 49), y las partículas chocan contra la pared exterior y caen al fondo del ciclón. Los cambios de velocidad y de dirección también contribuyen al proceso, mientras los gases de escape se descargan por la parte superior del colector. Los finos recolectados en el fondo del ciclón son recogidos por un tornillo transportador de retorno de polvo, y pueden ser devueltos a la planta o retirados.



Fuente: Asphalt Institute

Figura 49. Colector ciclónico que retorna partículas finas de mayor tamaño al secador

4.6.10 Colectores Secundarios

La función del colector secundario es filtrar las partículas de polvo más finas. El tipo más común de colector secundario es el conocido como baghouse o filtro de bolsas de tela. Un filtro de bolsas de tela (ver Figura 50) es una gran estructura metálica que contiene cientos de mangas filtrantes de fibra resistente al calor; una unidad típica puede contener hasta 800 bolsas. Opera según un principio similar al de una aspiradora: los gases de escape cargados de polvo son succionados a través de las bolsas filtrantes, las cuales están soportadas por largas jaulas de alambre para evitar su colapso. El polvo queda atrapado en la parte exterior de la bolsa mientras el aire pasa a través de la tela filtrante hacia el lado de aire limpio, eliminando eficazmente todo el polvo de la corriente de escape. Cuando operan correctamente, los filtro de bolsas de tela pueden ser altamente eficientes, removiendo más del 99 por ciento del polvo proveniente del secador.

Fuente: CMI Roadbuilding, Inc.

Figura 50. Colector de polvo tipo filtro de bolsas de tela

El polvo se acumula continuamente en el exterior del filtro de tela mientras el secador está en operación. Periódicamente, se pasa un pulso de aire a través de la bolsa en la dirección opuesta, causando que la bolsa se flexione en reverso. El polvo recolectado se desprende de la bolsa y cae a la tolva inferior del filtro de mangas. Este polvo recolectado puede ser devuelto al proceso de producción de mezcla o eliminado. Cuando el polvo se devuelve al proceso de la planta, ciertas prácticas operativas son importantes para mantener el retorno de polvo uniforme y consistente. La introducción no uniforme de finos del filtro de bolsas de tela de vuelta a la planta puede causar resultados erráticos en las pruebas volumétricas. Consulte la Sección 4.3.3.

4.8 ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE LA MEZCLA

Para evitar paradas de planta debido a interrupciones en las operaciones de pavimentación o a la falta de camiones de acarreo, la mayoría de las plantas de asfalto están equipadas con uno o más silos de almacenamiento o con un depósito de compensación (surge bin) para el almacenamiento temporal de la mezcla asfáltica. A medida que la mezcla fresca sale de la planta, se deposita en un transportador cerrado de arrastre con tablillas metálicas, el cual la eleva hasta la parte superior del silo o depósito, donde ingresa y permanece almacenada hasta ser descargada en los camiones por la parte inferior.

Los silos de almacenamiento aislados (mostrados en la Figura 51), con capacidades de varios cientos de toneladas, pueden almacenar la mezcla durante varias horas. Los tiempos prolongados de almacenamiento afectan las propiedades volumétricas de la mezcla y pueden envejecer prematuramente el ligante. Por esta razón, la mayoría de las agencias cuentan con especificaciones que limitan el tiempo que una mezcla puede permanecer almacenada.

Fuente: Duval Asphalt

Figura 51. Depósitos de almacenamiento aislados

Las plantas portátiles de mezcla de tambor equipadas con estructuras de almacenamiento auto-erigibles se utilizan con mayor frecuencia en sitios de planta remotos o temporales. Estas tolvas de compensación no aisladas (mostradas en la Figura 52 y la Figura 53) son más pequeñas y pueden almacenar mezcla solo por periodos de tiempo relativamente cortos.

Fuente: Asphalt Institute

Figura 52. Tolva de compensación portátil

Fuente: Asphalt Institute

Figura 53. Depósito de almacenamiento portátil

Los silos funcionan adecuadamente si se siguen ciertas precauciones, pero pueden ser una fuente importante de segregación si la mezcla no se introduce correctamente en el silo. La mezcla nunca debe permitirse fluir de manera continua hacia un silo de almacenamiento; las diferencias en el tamaño de las partículas y el impulso del material harán que la mezcla se segregue. Normalmente, se coloca un pequeño dosificador (o contenedor de retención) debajo del transportador de arrastre con tablillas metálicas, con su abertura alineada directamente sobre la línea central del silo. Una vez que se ha acumulado una cantidad preestablecida, las compuertas en la parte inferior del dosificador se abren y cierran automáticamente de manera totalmente abierta y cerrada, liberando la mezcla en una sola masa (ver Figura 54). Durante la operación continua, el dosificador nunca debe vaciarse por completo, y el nivel de mezcla en el silo de almacenamiento debe mantenerse entre un tercio y dos tercios de la capacidad del silo para minimizar la segregación.

Fuente: National Asphalt Pavement Association

Figura 54. Depósito de almacenamiento

4.9 PESAJE Y DESPACHO

Desde el silo de almacenamiento temporal, la mezcla asfáltica se deposita en los camiones que están listos para ser transportados a los sitios de pavimentación. (Véase el Capítulo 6 para los procedimientos de carga de camiones). La cantidad de mezcla entregada desde la planta hasta el sitio de pavimentación puede determinarse mediante cualquiera de los siguientes tres métodos:

- Uso del sistema de registro automático de una planta por lotes.
    - El sistema registra el peso acumulado de las tandas individuales que se descargan directamente en un camión desde el mezclador. Las básculas internas de la planta deben estar calibradas y certificadas para usar este método exitosamente.
- Uso de celdas de carga instaladas en las patas de soporte de un silo de almacenamiento.
    - Las celdas de carga acumulan colectivamente la resta de peso del silo conforme se carga un camión.
    - Las celdas de carga están calibradas y certificadas como precisas.
- Pesaje de camiones cargados en básculas.
    - Las básculas indican directamente el peso tara del camión y el peso neto de la mezcla.
    - Las básculas deben estar niveladas, horizontales y tener la longitud suficiente para pesar todos los ejes del camión al mismo tiempo. El tipo más común de báscula para camiones utilizado es la báscula de vigas (ver Figura 55)

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 55. Báscula para camiones debajo de contenedores de almacenamiento

La precisión de cualquier báscula para camiones o sistema de pesaje debe comprobarse periódicamente. Las cargas de camiones seleccionadas al azar a lo largo de la producción y pesadas en una báscula alternativa certificada proporcionan una buena comprobación de la precisión y calibración del sistema de pesaje utilizado.

La precisión de cualquier báscula para camiones o sistema de pesaje debe revisarse periódicamente

4.10 SEGURIDAD

Ver vídeos:

Seguridad en proyectos de asfalto

El personal que trabaja en una planta de asfalto debe estar siempre atento a la seguridad y alerta ante posibles peligros para el personal y los bienes. Nunca se insistirá lo suficiente en las consideraciones de seguridad
Las consideraciones de seguridad en una planta de asfalto incluyen lo siguiente:

- El polvo no solo es una amenaza para los pulmones y los ojos, sino que también puede contribuir a reducir la visibilidad, especialmente cuando se utilizan camiones, palas cargadoras u otros equipos cerca de las pilas de almacenamiento o los silos fríos. La reducción de la visibilidad en el tráfico laboral es una de las principales causas de accidentes.

- El ruido puede ser un peligro importante. Es perjudicial para la audición y puede distraer la atención de los trabajadores respecto a los equipos en movimiento u otros peligros.
- Las correas en movimiento deben ser motivo de preocupación constante, al igual que las correas de los motores, las ruedas dentadas y las transmisiones por cadena. Todas las poleas, correas y mecanismos de transmisión deben estar cubiertos o protegidos de alguna otra forma. Nunca se debe llevar ropa holgada que pueda engancharse en la maquinaria en una planta de asfalto.
- Una buena limpieza es esencial para la seguridad de la planta. La planta y el patio deben mantenerse libres de escombros, tuberías, mangueras u otros obstáculos que puedan causar tropiezos y caídas.
- Se requieren líneas de alta tensión para distribuir la energía eléctrica a todos los componentes principales de la planta. Las líneas eléctricas deben estar correctamente instaladas o enterradas y protegidas. Cualquier conexión suelta, aislamiento desgastado o equipo con una conexión a tierra inadecuada debe repararse inmediatamente.
- Los trabajadores de la planta no deben trabajar en o cerca de las pilas de almacenamiento o los silos de alimentación en frío mientras la planta esté en funcionamiento. Con campos de visión limitados, los operadores de cargadoras que se centran en la gestión de las pilas de almacenamiento y en mantener los silos de alimentación en frío correctamente cargados pueden pasar por alto fácilmente a una persona que se encuentre en el suelo. Se recomienda impartir formación sobre los puntos ciegos de los equipos.
- Las llamas de los quemadores y las altas temperaturas alrededor de los secadores de la planta son peligros evidentes. La instalación de válvulas de control que puedan accionarse desde una distancia segura en todas las líneas de combustible ayuda a reducir el peligro. También deben instalarse dispositivos de seguridad contra llamas en todas las líneas de combustible. No debe permitirse fumar cerca de los tanques de almacenamiento de asfalto o combustible. Deben realizarse comprobaciones frecuentes para detectar fugas en las líneas de calefacción de aceite y en el revestimiento de las líneas de distribución de asfalto. Deben instalarse válvulas de seguridad en todas las líneas y estas deben estar en buen estado de funcionamiento. Se deben instalar pantallas, barreras de protección y escudos como protección contra el vapor, el asfalto caliente, las superficies calientes y peligros similares.
- Para los trabajadores que manipulan ligantes asfálticos líquidos calientes, todas las camisas deben ser de manga larga, completamente abotonadas, llevarse por dentro y con los puños abotonados en las muñecas. Los guantes con mangos que se extienden hasta el brazo deben quedar holgados para que se puedan quitar fácilmente si se cubren accidentalmente con asfalto caliente. Los pantalones sin puños deben cubrir las botas.
- Los trabajadores deben tener mucho cuidado al moverse por los componentes de la planta, observando las cribas, contenedores calientes y recolectores de muestras. Debe haber escaleras o escaleras cubiertas o protegidas para proporcionar un acceso seguro a todas las partes de la planta. Todas las escaleras y plataformas deben estar

provistas de barandillas seguras. Todos los trabajadores que se encuentren en las inmediaciones de la planta siempre deben llevar casco.

- Los patrones de tráfico deben planificarse teniendo en cuenta tanto la seguridad como la comodidad. Los camiones que entran en la planta para recoger una carga de mezcla caliente no deben cruzar el camino de los camiones cargados que salen de la planta. Además, los camiones no deben tener que dar marcha atrás.

Se debe llevar un informe resumido diario de todas las actividades de la planta. Este debe incluir los resultados de todas las pruebas realizadas durante el día y una tabla con las cantidades de material recibido y utilizado durante la producción.
Las siguientes listas de verificación pueden ser utilizadas según sea necesario por el personal de operación de la planta y QC para determinar la preparación de la planta para la producción:

LISTAS DE VERIFICACIÓN DE PLANTAS

Lista de verificación para la manipulación y el almacenamiento de materiales

- ❑ ¿Cumplen los agregados con las especificaciones?
- ❑ ¿Se están produciendo los tamaños adecuados?
- ❑ ¿Es satisfactorio el almacenamiento de áridos?
- ❑ ¿Están bien separadas las pilas de almacenamiento?
- ❑ ¿Están bien construidas las pilas de almacenamiento?
- ❑ ¿Se manipulan correctamente los áridos almacenados?
- ❑ ¿Se controla la segregación?
- ❑ ¿Se mantiene seco el relleno mineral o la cal hidratada?

Lista de comprobación para alimentación en frío

- ❑ ¿La configuración de la alimentación en frío cumple con las especificaciones?
- ❑ ¿Los contenedores de alimentación en frío contienen áridos del tamaño adecuado?
- ❑ ¿Los contenedores de alimentación en frío están cargados correctamente?
- ❑ ¿Los contenedores de alimentación en frío fluyen correctamente (sin puentes)?
- ❑ ¿Los alimentadores de áridos fríos funcionan satisfactoriamente?
- ❑ ¿Están correctamente ajustadas las compuertas de los alimentadores de áridos fríos?
- ❑ ¿Se están alimentando todos los áridos fríos de manera uniforme?
- ❑ ¿Están calibrados los alimentadores de áridos fríos?

Lista de comprobación para el calentamiento del asfalto, la circulación y la temperatura de la mezcla

- ❑ ¿Se calienta el asfalto de manera uniforme a la temperatura especificada?
- ❑ ¿Se han comprobado todas las líneas en busca de fugas?
- ❑ ¿Las temperaturas de producción de la mezcla están dentro de las especificaciones?
- ❑ ¿Se ha calibrado la alimentación del aglutinante?

Lista de comprobación para la planta de mezcla de tambor

- ❑ ¿Se han calibrado las alimentaciones de áridos?
- ❑ ¿Se ha calibrado la alimentación de ligante líquido?
- ❑ ¿Están interconectadas las alimentaciones de áridos y ligante?
- ❑ ¿Están los componentes de la planta en buen estado y ajustados?
- ❑ ¿Está el aglutinante a la temperatura adecuada cuando se introduce en el tambor?
- ❑ ¿Parece la mezcla estar recubierta de manera uniforme?
- ❑ ¿Gotea agua desde la parte inferior del silo de almacenamiento?
- ❑ ¿Cumplen las balanzas con las especificaciones?
- ❑ ¿Se han calibrado las balanzas?
- ❑ ¿Se ha comprobado la tolerancia de las balanzas?

Lista de comprobación para planta de hormigón

- ❑ ¿Cumplen las básculas con las especificaciones?
- ❑ ¿Se han calibrado las básculas?
- ❑ ¿Se ha comprobado la tolerancia de las básculas?
- ❑ ¿El cubo del aglutinante se tara correctamente?
- ❑ ¿La caja de pesaje cuelga libremente?
- ❑ ¿Las piezas de la mezcladora están en buen estado y bien ajustadas?
- ❑ ¿Se está mezclando el lote del tamaño adecuado?
- ❑ ¿Los cajones del contenedor se extraen en la secuencia adecuada?
- ❑ ¿Se distribuye el aglutinante de manera uniforme a lo largo y ancho de la mezcladora?
- ❑ ¿Están los áridos y el aglutinante a la temperatura adecuada?
- ❑ ¿Hay alguna válvula o compuerta con fugas?
- ❑ ¿Es adecuado el tiempo de mezcla?
- ❑ ¿Están los puntos de pesaje ajustados correctamente para los pesos por lote?
- ❑ ¿Giran los ejes de la mezcladora a la velocidad adecuada?

- ❑ ¿Es suficiente la capacidad de las cribas para manejar la alimentación procedente del secador?
- ❑ ¿Están limpias las cribas?
- ❑ ¿Están desgastadas o rotas las cribas?
- ❑ ¿Es irregular o excesivo el arrastre de la criba?
- ❑ ¿Son sólidas las particiones de los silos calientes, sin signos de desgaste excesivo?
- ❑ ¿Fluyen libremente las tolvas de rebose?
- ❑ ¿Se mantiene la cantidad de material necesaria en cada silo?
- ❑ ¿Es adecuado el acceso para el muestreo?

Lista de comprobación para secadora y colector de polvo

- ❑ ¿Cumplen el secador y el colector de polvo con las especificaciones?
- ❑ ¿Está el agregado correctamente secado?
- ❑ ¿Están los agregados a la temperatura adecuada?
- ❑ ¿Están equilibrados los componentes del secador?
- ❑ ¿Está equilibrada la producción del secador con los demás componentes de la planta?
- ❑ ¿Están correctamente instalados y calibrados los dispositivos de medición de la temperatura?
- ❑ ¿Se desperdician los finos recogidos o se devuelven a la cámara de mezcla?
- ❑ ¿Está equilibrado el sistema de retorno de polvo con el secador?

Lista de comprobación para silos de almacenamiento

- ❑ ¿El silo contiene un dosificador?
- ❑ ¿Los deflectores u otros dispositivos para evitar la segregación funcionan correctamente?
- ❑ ¿La abertura de descarga del silo está configurada correctamente para evitar la segregación?
- ❑ ¿La compuerta de descarga se abre y se cierra de manera eficiente?

Lista de verificación para el muestreo y las pruebas

- ❑ ¿Se están tomando muestras suficientes para cumplir con el plan de muestreo?
- ❑ ¿Las muestras son representativas del material
- ❑ ¿Se están realizando todas las pruebas correctamente?
- ❑ ¿Los resultados de las pruebas están disponibles con la suficiente rapidez como para ser eficaces?
- ❑ ¿Los registros están completos y actualizados?

Lista de verificación para responsabilidades diversas

- ❑ ¿Se han inspeccionado las plataformas de los camiones?
- ❑ ¿Se han drenado las plataformas de los camiones después de aplicar el agente desmoldeante?
- ❑ ¿El agente desmoldeante figura en la Lista de productos aprobados (APL) de la agencia?
- ❑ ¿Cumplen los camiones los requisitos de las especificaciones?
- ❑ ¿Están los camiones equipados con lonas o cubiertas?
- ❑ ¿Tiene la mezcla un aspecto uniforme?
- ❑ ¿Cumple la mezcla los requisitos de colocación?
- ❑ ¿Se ha instruido adecuadamente a todo el personal?

5. Preparación de la Superficie

5.1 INTRODUCCIÓN

Ver vídeos:
Capa de imprimación y de liga
Fresado y limpieza
Requisitos de suavidad en lo aeródromos

El rendimiento de una mezcla asfáltica bajo el tráfico está directamente relacionado con el estado de la superficie sobre la que se colocan las capas de pavimento. En el caso de un pavimento asfáltico de espesor completo, si el estado del suelo de la subbase es deficiente (especialmente si esta húmedo y presenta surcos bajo los camiones de transporte), la vida útil final de la carretera puede reducirse significativamente. En el caso de las capas de asfalto colocadas sobre una capa base granular nueva y sin tratar, el material de la base debe ser estable, la superficie debe estar seca y la base no debe estar deformada por los camiones que transportan la mezcla a la pavimentadora. En el caso de la mezcla colocada sobre capas de asfalto existentes, la superficie debe estar debidamente preparada, con todos los daños y defectos reparados y la superficie limpia. También debe utilizarse una capa de adherencia para garantizar la unión entre la superficie del pavimento existente y la nueva capa de asfalto.

Cuando la mezcla de asfalto se coloca sobre un pavimento de hormigón de cemento Portland (PCC), la superficie de PCC debe estar debidamente preparada y se debe aplicar una capa de adherencia

El rendimiento de una mezcla asfáltica bajo el tráfico está directamente relacionado con el estado de la superficie sobre la que se colocan las capas de pavimento.

5.2 PREPARACIÓN DE LA BASE PARA NUEVOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

5.2.1 Suelo de la subrasante

Si el pavimento asfáltico se va a colocar directamente sobre el suelo de la subbase, el material de la subbase debe cumplir todos los requisitos aplicables en cuanto a contenido de humedad, densidad, soporte estructural, pendiente, elevación y uniformidad. Una vez que se haya determinado que el suelo de la subbase está listo para el pavimentado, y antes de que se permita comenzar el pavimentado, se debe compactar la subbase para garantizar que pueda soportar el peso del tráfico de transporte. El compactado es un proceso en el que se comprueba si el suelo compactado presenta zonas blandas, con el fin de proporcionar un sistema de soporte equilibrado para la estructura del pavimento. La subbase debe proporcionar una base firme antes de aplicar la capa de imprimación o de comenzar el pavimentado asfáltico. Si se produce una deformación del suelo de la subbase durante la operación de pavimentado, se debe detener la colocación de la mezcla hasta que se pueda corregir el estado del suelo.

5.2.2 Capa base granular

Si la capa de asfalto se va a construir directamente sobre una capa base granular nueva o existente sin tratar, ese material base debe colocarse según la pendiente y el perfil y cumplir todos los requisitos de contenido de humedad, densidad, resistencia estructural y suavidad. Sin embargo, se debe realizar un compactado de prueba sobre el material base granular y se debe anotar la cantidad de deflexión de la base y la cantidad de hendidura de las ruedas del camión en el material de la capa base granular. Si el material base es estable y seco y no se deforma ni se hunde de manera significativa bajo las ruedas de un camión de doble eje cargado, se debe permitir el inicio de la colocación de la capa de imprimación o de la nueva mezcla asfáltica. Si el estado del material granular no es satisfactorio, la capa base debe reelaborarse o estabilizarse hasta que se encuentre en condiciones adecuadas para el recubrimiento.
Consulte con la agencia propietaria si existe algún requisito específico para el rodaje de prueba.

5.2.3 Capa base

La capa de imprimación actúa como una capa impermeabilizante temporal que protege el suelo de la subbase y la capa base. Una capa de imprimación ayuda a mantener el contenido de humedad preparado de los materiales de la subbase y la base, ya que evita que la humedad se escape y, al mismo tiempo, ayuda a evitar que estas capas absorban el exceso de humedad durante las lluvias antes de la pavimentación. Las capas de imprimación permiten que estas capas se utilicen para el tráfico ligero en las carreteras, unen el polvo de la superficie de estas capas de material, favorecen la adherencia y evitan el deslizamiento entre estas capas y la nueva capa de asfalto. Sin embargo, el objetivo principal de una capa de imprimación es proteger los materiales subyacentes de la humedad. Si los materiales subyacentes pueden

cubrirse antes de la lluvia, es posible que no sea necesaria una capa de imprimación.
Por lo general, no es necesario aplicar una capa de imprimación de emulsión asfáltica o asfalto fluidificado sobre el suelo de la subbase. Esto es especialmente cierto cuando el suelo es arcilloso o limoso, ya que el material de la capa de imprimación no puede ser absorbido por ese material de la subbase. El uso de una capa de imprimación en suelos de subrasante arenosos también es cuestionable. Si el material arenoso se desplaza excesivamente bajo las ruedas de los camiones de transporte, debe estabilizarse con algún tipo de material aglutinante antes de pavimentar para lograr las propiedades de carga requeridas. En tales casos, la aplicación de una capa de imprimación generalmente no será suficiente para mantener el suelo arenoso en su lugar durante las operaciones de pavimentación. Una capa de imprimación no debe utilizarse como sustituto de una preparación adecuada del suelo de la subbase. Cuando se utiliza una capa de imprimación, el material de la capa de imprimación debe aplicarse a la capa base con un distribuidor de presión al menos 48 horas antes de comenzar la pavimentación.
Históricamente, los tipo de asfalto fluidificado han sido el material preferido para las capas de imprimación debido a sus excelentes cualidades de penetración en la base. Sin embargo, el aumento de las restricciones medioambientales sobre el uso de materiales de tipo de asfalto fluidificado ha provocado una disminución de su disponibilidad y uso. La industria ha respondido con el desarrollo de EAP (imprimaciones de asfalto emulsionado) que mejoran la capacidad de la emulsión para imitar a los tipos de asfalto fluidificado en términos de penetración y son más respetuosas con el medio ambiente que los tipo de asfalto fluidificado.

Un EAP penetra más lentamente y se aplica a una velocidad menor. A diferencia de una imprimación de corte, los EAP son más eficaces cuando se mezclan con el material base mediante una motoniveladora o un equipo de mezcla rotativa. Esta mezcla se puede realizar en el momento del nivelado final y el apisonamiento del material base. Las aplicaciones de imprimación se realizan en las mismas condiciones meteorológicas generales que el pavimentado; sin embargo, para que los tipo de asfalto fluidificado se curen adecuadamente, se requieren entre 24 y 72 horas de clima favorable. Los tiempos de curado dependen en gran medida del material y de las condiciones meteorológicas.
La tasa de imprimación ideal es la cantidad de material que la base agregada absorberá en un período de 24 horas. Las tasas de aplicación típicas para las capas primarias varían según el tipo de material utilizado. Cuando se utiliza un tipo de asfalto fluidificado de curado medio, ya sea MC-30 o MC-70 según lo especificado en AASHTO M 82, la tasa de aplicación oscila entre 0,2 y0,5 galones/yarda cuadrada (0,9 a 2,3 litros/metro cuadrado). Cuando se utiliza una Emulsión Asfáltica de Penetración, las tasas de aplicación varían entre 0,1 y 0,3 galones/yarda cuadrada/pulgada de profundidad de escarificación (0,5 a 1,4 litros/metro cuadrado por cada 25 mm de profundidad). Las tasas de aplicación exactas las determina el ingeniero del proyecto en función de las condiciones imperantes en el momento de realizar el trabajo. Si no se absorbe completamente todo el material de la capa de imprimación, el exceso debe secarse con arena o eliminarse

5.3 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE ASFALTADA PARA REVESTIMIENTOS ASFALTADOS

El grado de preparación necesario para un pavimento asfáltico existente depende del estado de dicha superficie. Como mínimo, se deben eliminar y sustituir las zonas deterioradas, reparar adecuadamente los baches, limpiar y sellar las grietas y rellenar los surcos o, preferiblemente, eliminarlos mediante fresado en frío.

5.3.1 Sustitución y reparación del pavimento

No es aconsejable intentar cubrir las zonas deterioradas de un pavimento existente con material de recubrimiento nuevo. Se debe proceder a la retirada y sustitución de todas las zonas del pavimento existente que presenten daños graves relacionados con la carga. Todas las mezclas asfálticas y los materiales granulares de base que se hayan deteriorado deben excavarse o fresarse en frío y, a continuación, reciclarse o desecharse. La deformación de la subbase debe repararse mediante socavación y sustitución con material de relleno adecuado. Se debe instalar un drenaje subterráneo adecuado según sea necesario. Se debe colocar nuevo material granular de base, una capa de base estabilizada o mezcla asfáltica para que la resistencia de la estructura del pavimento en cada zona dañada sea la misma que la de las capas de pavimento en buen estado circundantes. Si se utiliza mezcla asfáltica para reparar una zona extensa, se debe colocar con una pavimentadora y compactar con uno o varios rodillos grandes. Las zonas dañadas localizadas deben repararse adecuadamente.

Cada área debe recortarse hasta llegar al pavimento en buen estado y nivelarse, con los lados lo más verticales posible, retirando el material suelto y el agua del agujero, aplicando una capa de adherencia a los lados y al fondo del agujero, colocando la mezcla en el agujero y compactando adecuadamente el nuevo material, preferiblemente con un rodillo (véanse las figuras 56, 57 y 58). Si el Bache tiene más de 4 pulgadas (100 mm) de profundidad, la mezcla debe colocarse en más de una capa y cada capa debe compactarse adecuadamente. Si el número de parches localizados necesarios es excesivo, se debe considerar la sustitución completa del carril, teniendo en cuenta todos los impactos económicos y operativos

No es aconsejable intentar cubrir las áreas deterioradas de un pavimento existente con material de recubrimiento nuevo. La remoción y el reemplazo deben realizarse en todas las áreas del pavimento existente donde se hayan producido daños graves

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 56. Material existente retirado antes del parcheo

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 57. Material colocado en parche localizado

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 58. Compactación del parche

5.3.2 Relleno de Grietas

Las secciones del pavimento con fisuración severa, especialmente aquellas con grietas en patrón (por ejemplo, tipo mapa o piel de cocodrilo), deben ser bacheadas o reemplazadas. El beneficio de rellenar otras grietas en la superficie depende, en parte, del ancho de las grietas. Si las grietas son estrechas (menos de 3/8 pulgadas [10 mm]), es poco probable que el material de sellado penetre en la grieta y, en su lugar, quedará acumulado sobre la superficie del pavimento. Este tipo de grietas debe ensancharse, si se considera necesario, utilizando un router mecánico antes de proceder con el sellado. Si están presentes grietas más anchas, deben limpiarse con aire a presión y retirarse completamente los residuos. El material sellante debe colocarse únicamente cuando las grietas estén limpias y secas. El nivel del material de sellado debe quedar ligeramente por debajo de la superficie del pavimento circundante y no debe derramarse sobre los bordes, ya que podría generar un bulto en la nueva capa de pavimento durante el proceso de compactación (ver Figura 59). En el caso de grietas sobrebandadas previamente, puede ser necesario calentar y retirar el material sellante envejecido de la superficie antes de colocar una capa de refuerzo u overlay, con el fin de evitar nuevamente la formación de bultos. Si las grietas son mayores a 1 pulgada (25 mm) o si el pavimento adyacente presenta hundimientos o desplazamientos, se recomienda aplicar una masilla como sellado previo al overlay para lograr una superficie final más uniforme.

Dependiendo de la causa de la fisuración, la cantidad de fisuración reflectiva que aparezca en una capa de refuerzo puede reducirse mediante la aplicación de un tratamiento superficial sobre el pavimento existente. Si la estructura del pavimento presenta un gran número de grietas, puede considerarse la opción de aplicar un tratamiento superficial en lugar de sellar cada grieta individualmente. Las grietas deben limpiarse, si es posible, retirando el material suelto con aire a presión. El tratamiento superficial debe aplicarse cuando la superficie del pavimento esté limpia y seca, y debe consistir en una aplicación simple de material asfáltico (cemento asfáltico, asfalto rebajado o emulsión asfáltica) junto con un agregado de cobertura. Aunque no es muy común,

también puede emplearse como alternativa un sello de lechada, compuesto por una emulsión asfáltica, agregado fino y agua.

Fuente: U.S. Army Corps of Engineers

Figura 59. Bulto causado por el uso excesivo de sellador de grietas

5.3.3 Capas de nivelación

La práctica común en el pasado ha sido colocar una capa de nivelación sobre la superficie del pavimento existente para mejorar la regularidad de la estructura del pavimento. Esta capa de nivelación, a veces llamada capa de cuña y nivelación o scratch course, está diseñada para rellenar las zonas bajas de la superficie del pavimento. La acción de nivelación se logra utilizando la regla flotante del pavimentador, colocando mayor cantidad de mezcla asfáltica en las zonas bajas que en las zonas altas del pavimento existente. Sin embargo, las áreas con un espesor mayor de mezcla suelen compactarse más que las áreas con un espesor menor. Este problema, denominado compactación diferencial, hace necesario construir múltiples capas sobre un pavimento que se encuentra en mal estado antes de poder obtener una superficie verdaderamente lisa.

A medida que la mezcla pasa por debajo de la regla del pavimentador, se encuentra en una condición relativamente suelta, siendo solo ligeramente compactada por la regla vibratoria. La compactación realizada por los rodillos reduce el espesor de la capa recién colocada. La regla práctica indica que las mezclas convencionales se reducen aproximadamente 1/4 de pulgada por cada 1 pulgada (6 mm por cada 25 mm) de espesor compactado. Por lo tanto, para lograr una capa compactada de 1 pulgada (25 mm) de espesor, el pavimentador debe colocar alrededor de 1-1/4 pulgadas (31 mm) de mezcla. De manera similar, para construir una capa con un espesor compactado de 3 pulgadas (75 mm), se necesitarían aproximadamente 3-3/4 pulgadas (95 mm) de mezcla saliendo desde la regla. Asimismo, se ha observado un mejor desempeño en las capas de nivelación cuando la gradación se ubica hacia el lado fino de la Línea de Máxima Densidad (MDL). La mezcla asfáltica debe colocarse a un espesor compactado no menor a 3 veces su NMAS para mezclas de gradación fina y no menor a 4 veces su NMAS

para mezclas de gradación gruesa. Además, es recomendable utilizar una gradación con NMAS menor, ya que las gradaciones de mayor tamaño son más propensas a que las partículas gruesas se arrastren y marquen la superficie generada en los puntos altos de la capa nivelada. Cuando se coloca una capa de nivelación, la mezcla asfáltica que se deposita en las zonas bajas (como las huellas de rueda si el pavimento presenta ahuellamiento) tendrá un mayor espesor que la mezcla colocada sobre los puntos altos de la superficie (entre las huellas). La mezcla más gruesa se compactará más bajo los rodillos, especialmente si se utiliza un rodillo neumático, que la mezcla más delgada. Como resultado, seguirán existiendo zonas bajas en las huellas de rueda, donde la mezcla habrá sido compactada en un grado diferente (y por lo tanto con contenido de vacíos distinto) respecto a la mezcla ubicada entre las huellas. Debido al problema de la compactación diferencial, por lo general se requieren múltiples capas de mezcla para eliminar la irregularidad de la superficie del pavimento existente. Una regla práctica indica que una capa, después de la compactación, eliminará aproximadamente el 80 % de una depresión. Dos capas, compactadas por separado, eliminarán aproximadamente el 95 % de una depresión.

5.3.4 Fresado

Ver Video:
Milling and Cleaning

El fresado, también llamado planeo en frío, es un proceso que remueve una porción de la capa de pavimento existente para proporcionar la elevación y textura deseadas para capas de refuerzo en asfalto o concreto. En general, el fresado se clasifica en fresado a profundidad total o fresado a profundidad parcial, dependiendo de la cantidad de material removido, lo cual suele estar determinado por la condición del pavimento existente. El fresado a profundidad total se refiere a la remoción de toda la capa asfáltica hasta llegar a la base, y se aplica en estructuras de pavimento severamente deterioradas. El fresado a profundidad parcial remueve únicamente la porción superior de la capa asfáltica que presenta deterioro (como ahuellamiento y/o fisuración), mientras que la capa asfáltica restante continúa funcionando como capa estructural después de la rehabilitación. Determinar la profundidad de fresado es una consideración principal en la rehabilitación a profundidad parcial, ya que esta profundidad afecta la calidad, productividad y costo del proyecto. El objetivo es fresar a una profundidad por debajo de los deterioros para no comprometer el desempeño esperado de la nueva capa asfáltica.

El fresado puede realizarse en cualquier ancho necesario, desde 6 pulgadas (150 mm) hasta más de 13 pies (4 m). La Figura 60 muestra una máquina de fresado típica. Si está equipada con controles automáticos de nivelación y pendiente, similares a los utilizados en un pavimentador de asfalto, la máquina fresadora puede producir una superficie nivelada en una sola pasada sobre la superficie existente. El RAP generado por el proceso de fresado puede transportarse de regreso a la planta de asfalto para su reciclaje futuro. Además, si la superficie fresada se limpia adecuadamente, su textura puede mejorar la adherencia entre las capas nueva y existente, y puede reducir la posibilidad de deslizamiento del refuerzo sobre la superficie original.

Fuente: Roadtec

Figura 60. Fresadora típica

Cuando la profundidad de fresado es variable o ligeramente menor que el espesor de la capa asfáltica existente, puede formarse una "costra". Una costra se refiere a una capa delgada de la capa existente que no fue completamente removida durante el proceso de fresado (ver Figura 61). La presencia de esta costra suele generar variaciones en la textura y en la elevación de la superficie. Además, la adhesión entre la costra y la capa asfáltica existente puede debilitarse durante el fresado y el pavimentado. La presencia de costras tiende a generar menor calidad de rodadura y problemas de densidad, debido a la compactación diferencial entre las áreas con costra y las que fueron fresadas correctamente. También es probable que provoquen deterioros prematuros, como fisuración y delaminación, lo que finalmente acorta la vida útil de la superficie del pavimento. Para evitar la formación de costras, el contratista debe monitorear cuidadosamente la profundidad de fresado, especialmente cuando se trabaja sobre pavimento de concreto. Si se produce una costra durante la operación, el contratista debe bajar la cabeza de fresado para eliminarla completamente o retroceder y realizar otra pasada para retirarla por completo. El contratista y el propietario deben acordar cualquier ajuste en la profundidad de fresado, ya que esto probablemente requerirá colocar mayor cantidad de mezcla asfáltica, lo que puede generar un sobrecosto en el contrato. Reducir la velocidad de avance de la fresadora también puede ayudar a mitigar la aparición de costras.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 61. Formación de costra

Una superficie de pavimento que ha sido fresada suele quedar muy polvorienta y sucia. Una vez que el pavimento se ha secado, por lo general se requieren múltiples pasadas con una barredora mecánica para eliminar todos los residuos restantes de la superficie fresada. En algunos casos, puede ser necesario humedecer ligeramente la superficie fresada antes de barrer, o limpiarla con aire o incluso lavarla con agua para eliminar completamente el polvo y el material muy fino. Aunque esto no puede realizarse en aeródromos, permitir el tránsito sobre la superficie fresada ayuda a remover el polvo y las partículas finas. Cualquier polvo o suciedad que permanezca en la superficie fresada afectará significativamente la adherencia entre esa capa y la nueva capa asfáltica de refuerzo.

Cualquier polvo o suciedad que permanezca sobre la superficie fresada afectará significativamente la adherencia entre esa capa y la nueva capa de refuerzo asfáltico

Debido al aumento del área superficial del pavimento fresado (provocado por las ranuras dejadas por los dientes de corte de la fresadora), puede ser necesario aplicar una mayor cantidad de material de riego de liga para asegurar una adecuada adherencia entre las capas vieja y nueva (ver Figura 62). Ese incremento en cantidad depende del tipo, número, condición y espaciamiento de los dientes del mandril de corte de la fresadora, aunque típicamente se encuentra en un rango de 20 a 30 % más que para una superficie que no ha sido fresada.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 62. Riego de liga en una superficie fresada

5.4 PREPARACIÓN DE SUPERFICIE DE PCC PARA CAPAS DE REFUERZO ASFÁLTICAS

Cuando se coloca una mezcla asfáltica sobre un pavimento de concreto hidráulico PCC, la superficie de PCC también debe prepararse adecuadamente. Cualquier zona de deterioro severo en las losas de concreto debe cortarse, retirarse y reemplazarse, ya sea con una mezcla de PCC o con mezcla asfáltica, utilizando técnicas de reparación de losa a profundidad total. Si es necesario, también debe realizarse la corrección del material de la subbase o la subrasante subyacente. Las áreas severamente despostilladas en las juntas deben repararse mediante métodos de reemplazo de losa a profundidad parcial, utilizando PCC para dichas reparaciones. Las losas inestables o basculantes deben estabilizarse. Dependiendo de la condición del pavimento de PCC, pueden emplearse procedimientos como crack and seat, break and seat o rubblizing del pavimento existente antes de colocar el refuerzo, especialmente si las losas basculan bajo el tránsito. También puede considerarse el uso de una capa de alivio de fisuras entre el pavimento de PCC existente y la nueva capa de refuerzo.

Para las juntas que están mal selladas, el material de sellado viejo debe retirarse y las juntas deben limpiarse. Una vez que estén secas, las juntas deben rellenarse nuevamente con el material de sellado adecuado para juntas. Se debe tener cuidado de no sobrellenar las juntas, especialmente en clima frío, cuando estas se encuentran más abiertas. En todos los casos, al igual que con los selladores de grietas, el nivel final del material de sellado de juntas debe quedar por debajo de la superficie del pavimento circundante. Una vez completados los trabajos de bacheo y resellado, la superficie del pavimento de PCC debe limpiarse completamente utilizando barredoras mecánicas y aire a presión o lavado con agua, o ambos, según sea necesario.

5.5 RIEGO DE LIGA

Ver Video:
Prime and Tack Coat

El propósito del riego de liga es asegurar la adherencia entre todas las capas asfálticas. El riego de liga no debe utilizarse como sustituto de la limpieza de la superficie existente; es necesario remover el polvo y la suciedad acumulada mediante barredora mecánica o con aire o agua a presión. Si no se logra una buena adherencia entre la superficie existente y la nueva capa de refuerzo, puede ocurrir deslizamiento, y la nueva capa puede ser empujada longitudinalmente por el tránsito, especialmente en zonas de aceleración o frenado. Más importante aún, una mala adherencia reducirá significativamente la resistencia a la fatiga del pavimento, acortando su vida útil por varios años. Por lo tanto, la superficie del pavimento debe estar limpia antes de aplicar el riego de liga.

5.5.1 Materiales para riego de liga

El material para riego de liga normalmente es emulsión asfáltica, aunque también puede ser cemento asfáltico o asfalto rebajado (cutback). Una encuesta realizada en el NCHRP Synthesis 516, Tack Coat Specifications, Materials, and Construction Practices indicó que las emulsiones son los materiales más comunes para riego de liga, siendo SS-1, SS-1h, CSS-1 y CSS-1h las gradaciones más utilizadas en Norteamérica. También se emplean otros productos emulsificados, como las quick set (QS), las aniónicas de fraguado rápido (RS-1 y RS-1h) y las catiónicas de fraguado rápido (CRS-1 y CRS-1h). Las especificaciones para estas emulsiones se encuentran en AASHTO M 140 (emulsiones aniónicas) y AASHTO M 208 (emulsiones catiónicas). Asimismo, muchos productos patentados nuevos, clasificados como materiales de riego de liga

de baja rastreabilidad, están aumentando en su uso. Estos materiales están diseñados para mejorar el desempeño del pavimento evitando los problemas de rastreabilidad asociados con los riegos tradicionales. Por lo general, están formulados para endurecer rápidamente y adherirse mínimamente a las llantas de los vehículos de construcción.

Los materiales de riego de liga deben aplicarse mediante un distribuidor de presión, como se muestra en la Figura 63. Todas las boquillas del distribuidor deben tener el tamaño adecuado, estar completamente abiertas y funcionando correctamente, y deben estar orientadas al mismo ángulo respecto a la barra de aspersión (aproximadamente 30 grados). Además, la barra de aspersión debe ubicarse a la altura adecuada sobre la superficie del pavimento para garantizar un traslape doble o triple del material asfáltico líquido. Esto permite lograr el traslape correcto entre boquillas y una aplicación uniforme del riego de liga sobre la superficie de la vía. El material de riego de liga debe calentarse a la temperatura adecuada para que sea lo suficientemente fluido como para ser rociado uniformemente desde las boquillas, evitando que salga en forma de hilos.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 63. Distribuidor aplicando riego de liga

5.5.2 Tasa de aplicación del riego de liga versus tasa residual

La uniformidad de aplicación y una tasa de aplicación adecuada son fundamentales para lograr un riego de liga exitoso. La Figura 64 y la Figura 65 ilustran una aplicación de riego de liga no uniforme debido a una operación incorrecta del equipo, con exceso de material en algunas áreas y deficiencia en otras. Una aplicación adecuada de riego de liga, como se muestra en la Figura 66, dejará un contenido residual de ligante asfáltico de aproximadamente 0.040 a 0.070 gal/yd² (0.181 a 0.317 L/m²) sobre la calzada. La cantidad de riego de liga residual

La uniformidad de aplicación y una tasa de aplicación adecuada son fundamentales para lograr un riego de liga exitoso.

necesaria dependerá de la condición de la superficie del pavimento. Una superficie de textura abierta requiere más riego de liga que una superficie cerrada o densa, y una superficie seca y envejecida requiere más que una superficie rica en ligante o aflorada. Además, puede ser necesario aplicar una mayor cantidad en una superficie fresada, debido al incremento en el área superficial, como se explicó previamente. Puede requerirse una tasa residual de hasta 0.080 gal/yd² (0.362 L/m²) de ligante asfáltico para asegurar una adherencia adecuada. Las tasas residuales recomendadas para distintos tipos de superficies se presentan en la Tabla 5 y la Tabla 6.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 64. Aplicación no uniforme de riego de liga

Fuente: Dr. Imad Al-Qadi

Figura 65. Aplicación no uniforme de riego de liga

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 66. Aplicación uniforme de riego de liga

Tabla 5. Tasas recomendadas de aplicación de riego de liga — Unidades habituales estadounidenses

Tipo de superficie	Tasa residual de aplicación gal/yd²	Tasa de aplicación sin diluir* gal/yd²	Tasa de aplicación diluida 1:1* gal/yd²
Asfalto nuevo	0.020–0.045	0.030–0.065	0.060–0.130
Asfalto existente	0.040–0.070	0.060–0.105	0.120–0.210
Superficie fresada	0.040–0.080	0.060–0.120	0.120–0.240
PCC	0.030–0.050	0.045–0.075	0.090–0.150

*Se supone que la emulsión contiene un 33 % de agua y un 67 % de asfalto. Fuente: Instituto del asfalto

Tabla 6. Tasas recomendadas de aplicación de riego de liga — Unidades métricas

Tipo de superficie	Dosis de aplicación residual L/m²	Dosis de aplicación sin diluir* L/m²	Tasa de aplicación diluida 1:1* L/m²
New Asphalt	0.091–0.204	0.137–0.306	0.274–0.612
Existing Asphalt	0.181–0.317	0.272–0.476	0.544–0.952
Milled Surface	0.181–0.362	0.272–0.543	0.544–1.086
PCC	0.136–0.226	0.204–0.339	0.408–0.678

*Se supone que la emulsión contiene un 33 % de agua y un 67 % de asfalto. Fuente: Instituto del asfalto

Es esencial diferenciar entre la tasa residual de riego de liga (la cantidad de ligante asfáltico que permanece sobre la superficie del pavimento después de que el agua se ha evaporado) y la tasa de aplicación (la cantidad de emulsión rociada desde el distribuidor).

Es esencial diferenciar entre la tasa residual de riego de liga, que es la cantidad de ligante asfáltico que permanece sobre la superficie del pavimento después de que el agua se ha evaporado, y la tasa de aplicación, que es la cantidad de emulsión rociada desde el distribuidor. La mayoría de las emulsiones asfálticas contienen entre 60 y 65 % de ligante asfáltico residual y 35 a 40 % de agua, además de una pequeña cantidad de agente emulsionante; por simplicidad, suele asumirse que una emulsión está compuesta por dos tercios de cemento asfáltico y un tercio de agua. La cantidad de ligante residual que queda en la superficie una vez evaporada el agua es el factor más importante para lograr una adecuada adherencia entre el pavimento existente y la nueva capa asfáltica. Si el proyecto especifica únicamente la tasa residual y no la tasa de aplicación sin diluir, esta puede determinarse partiendo de la cantidad de ligante residual requerida y calculando hacia atrás la cantidad de emulsión que debe aplicarse desde el distribuidor.

Como ejemplo, supongamos que la superficie del pavimento existente es relativamente cerrada y densa. Se determina que la cantidad residual de ligante asfáltico necesaria sobre la superficie debe ser

debe ser de 0.040 gal/yd² (0.181 L/m²). Si se utiliza una emulsión asfáltica SS-1 sin diluir para la capa de adherencia, la tasa de aplicación para ese material debe ser aproximadamente 0.060 gal/yd² (0.271 L/m²), calculada como (0.040) ÷ (2/3) = 0.060 gal/yd² [(0.181) ÷ (2/3) = 0.271 L/m²]. Si la emulsión asfáltica SS-1 ha sido diluida con partes iguales de agua, la tasa de aplicación necesaria para obtener la misma cantidad de asfalto residual en la superficie del pavimento será diferente. Utilizando una tasa de dilución de 1:1, la tasa de aplicación para una cantidad residual de 0.040 gal/yd² (0.181 L/m²) será de 0.120 gal/yd² (0.543 L/m²). Por lo tanto, con el uso de una emulsión diluida 1:1, se debe aplicar el doble de emulsión a la superficie del pavimento desde el distribuidor para tener la misma cantidad de asfalto residual cuando toda el agua se haya evaporado. Se debe verificar si las especificaciones permiten la dilución de la capa de adherencia; esto no está permitido en proyectos de aeródromos militares.

Si no se considera la cantidad de agua en una emulsión asfáltica al determinar la tasa de aplicación desde el distribuidor, es posible que no se logre el grado correcto de adherencia. Una cantidad insuficiente de capa de adherencia no proporcionará una unión adecuada entre la capa de pavimento antigua y la nueva. Por otro lado, un exceso de capa de adherencia puede provocar el deslizamiento de la sobre capa sobre la superficie del pavimento existente y la posible exudación del material de la capa de adherencia a través de una sobre capa delgada. Si se utiliza cemento asfáltico como material para la capa de adherencia en lugar de una emulsión asfáltica, la cantidad residual de asfalto en la superficie del pavimento debe ser igual a la cantidad aplicada. Por lo tanto, si se requiere 0.040 gal/yd² (0.181 L/m²) de material ligante residual, la tasa de aplicación desde el distribuidor también debe ser de 0.040 gal/yd² (0.181 L/m²).

5.5.3 Rotura y Fraguado de la Capa de Adherencia

Cuando se aplica una emulsión asfáltica como capa de adherencia, esta tiene un color marrón porque contiene tanto cemento asfáltico como agua. Después de un corto período de tiempo, la emulsión "romperá" (cambiará de color de marrón a negro) y el agua comenzará a evaporarse (ver Figura 67). La velocidad de evaporación dependerá del tipo y grado de la emulsión utilizada, la tasa de aplicación, la temperatura de la superficie del pavimento existente y las condiciones ambientales. Una vez que toda el agua se ha evaporado, se dice que la emulsión ha "fraguado". La velocidad de fraguado depende de las mismas condiciones que controlan la velocidad de rotura de la emulsión. En la mayoría de las circunstancias, una emulsión fraguará en 1 a 2 horas.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 67. Capa de Adherencia de Emulsión Aplicada — Capa sin Romper (izquierda), Capa Rota (derecha)

Existe debate sobre si las mezclas asfálticas pueden colocarse sobre la capa de adherencia de emulsión antes de que haya fraguado o incluso antes de que haya roto. El material de la capa de adherencia antes de la rotura puede ser muy resbaladizo y propenso a desprenderse de la superficie aplicada al adherirse a los neumáticos de los vehículos. Cuando se utilizan pavimentadoras convencionales, es importante mantener todo el tráfico alejado de la capa de adherencia de emulsión hasta que haya roto y, de ser posible, hasta que haya fraguado. Con una pavimentadora de aspersión (ver Figura 68), la capa de adherencia se asperja justo delante de la regla enrasadora. Algunas agencias requieren una formulación especializada de capa de adherencia para usar con pavimentadoras de aspersión (ver la encuesta en NCHRP Síntesis 516), pero otras utilizan el mismo material que normalmente se emplearía. La capa de adherencia no tiene tiempo de romper con la pavimentadora de aspersión, y la emulsión romperá inmediatamente al entrar en contacto con la nueva mezcla asfáltica.

El agua, 0.080 gal/yd² (0.362 L/m²), normalmente se evaporará y escapará como vapor a través de la mezcla caliente suelta. No hay suficiente agua para reducir significativamente la temperatura de la capa.

Cuando se utilizan pavimentadoras convencionales, es importante mantener todo el tráfico alejado de la capa de adherencia de emulsión hasta que haya roto y, de ser posible, hasta que haya fraguado.

Fuente: Integral dx

Figura 68. Pavimentadora de Aspersión

Es importante que el material de la capa de adherencia permanezca en la superficie del pavimento para crear la unión entre las capas. Si el material de la capa de adherencia es recogido por los neumáticos de los camiones y arrastrado a lo largo de la vía, se deben hacer ajustes. La capa de adherencia debe dejarse fraguar antes de permitir que el tráfico de camiones de acarreo circule sobre ella, o bien se puede utilizar un vehículo de transferencia de material (MTV, por sus siglas en inglés), desplazado del carril que se está colocando. Muchas agencias también están especificando el uso de capas de adherencia de arrastre reducido (sin arrastre) para ayudar a mitigar la recolección de la capa de adherencia.

Si se utiliza cemento asfáltico como material para la capa de adherencia, este se enfriará a temperatura ambiente muy rápidamente. Además, debido a que no hay material portador (agua) que se evapore, la pavimentación puede seguir inmediatamente después de la aplicación de la capa de adherencia de cemento asfáltico.

Si la sobre capa se va a construir bajo tráfico, la capa de adherencia normalmente se coloca solo a una corta distancia delante de la pavimentadora, dentro del cierre de carril y lo suficientemente adelante para que la capa de adherencia fragüe adecuadamente antes de que la mezcla asfáltica se coloque sobre ella. El tráfico debe mantenerse alejado de la capa de adherencia. Si la vía que se está pavimentando está cerrada al tráfico, la capa de adherencia puede colocarse hasta 24 horas antes de la operación de colocación, siempre que no haya problemas con el viento depositando polvo o materiales orgánicos sobre la superficie recién tratada con adherencia. Hacer esto garantizará que la capa de adherencia esté completamente fraguada antes de que se coloque la mezcla sobre ella. Nunca es una buena práctica colocar la capa de adherencia un día, permitir que el tráfico circule sobre ella durante un período, y luego colocar la sobrecapa más tarde.

Si problemas con el equipo (fallas en la planta o en la pavimentadora) impiden que el material de la capa de adherencia que ha sido aplicado por el distribuidor sea pavimentado antes de que el tráfico deba usar la vía,

se sugiere reducir significativamente los límites de velocidad publicados en ese tramo de la vía hasta que pueda realizarse la operación de sobre capa. Dependiendo de la cantidad de cemento asfáltico residual en la superficie del pavimento y las condiciones ambientales, el nivel por la presencia del material de la capa de adherencia, especialmente en clima húmedo. El exceso de capa de adherencia también puede terminar en los vehículos, creando un problema importante de relaciones públicas. Además de reducir los límites de velocidad publicados, es muy recomendable aplicar una capa ligera de arena sobre la capa de adherencia para evitar su recolección por el tráfico y mejorar la resistencia al deslizamiento de ese tramo de la vía hasta que pueda colocarse la sobre capa. La tasa de aplicación de la arena debe estar en el rango de 4 a 8 lb/yd² (2.2 a 4.4 kg/m²), dependiendo de la tasa de aplicación del material de la capa de adherencia y la gradación de la arena. El exceso de arena debe barrerse de la superficie del pavimento con una aplicación adicional de capa de adherencia aplicada antes de colocar la sobre capa para garantizar una unión adecuada entre la sobre capa y la superficie existente.

Es importante que el material de la capa de adherencia permanezca en la superficie del pavimento para crear la unión entre las capas. Si el material de la capa de adherencia es recogido por los neumáticos de los camiones y arrastrado a lo largo de la vía, se deben realizar ajustes.

La aplicación de material de capa de adherencia es esencial cuando se construye una sobre capa sobre una superficie de pavimento antigua existente, ya sea asfalto, PCC o tratamiento superficial. A veces se asume que no se necesita capa de adherencia cuando se coloca una capa de mezcla nueva sobre otra capa de pavimento asfáltico que ha sido colocada en pocos días si la nueva capa subyacente no se ha ensuciado por el tráfico o por el polvo arrastrado por el viento. Sin embargo, el costo potencial para la agencia si existe una unión insuficiente entre las dos capas excede en gran medida el costo de aplicar la capa de adherencia. Las capas de adherencia deben usarse en una capa de mezcla asfáltica recientemente colocada, pero el contenido de asfalto residual debe ser mínimo: aproximadamente 0.020 gal/yd² (0.091 L/m²), o la mitad de lo que se necesita para la mayoría de las superficies existentes antiguas y compactas. Por lo tanto, la tasa de aplicación para una emulsión SS-1 sin diluir debe ser solo aproximadamente 0.030 gal/yd² (0.136 L/m²).

5.5.4 Distribuidores de Asfalto

Los distribuidores de asfalto (ver Figura 69 y Figura 70) están diseñados específicamente para aplicar productos asfálticos de manera uniforme. Consisten en un tanque aislado montado sobre camión o remolque con una capacidad que varía de 800 a 5,500 gal (3,000 a 20,800 L). La mayoría de los distribuidores están equipados con un sistema de calentamiento que mantiene el material a la temperatura de aplicación adecuada. También están equipados con una bomba accionada por motor que hace circular el material de la capa de adherencia desde el distribuidor hasta la barra de aspersión y crea presión en la barra de aspersión. Aunque los métodos para mantener la presión pueden variar, todos los distribuidores utilizan bombas para suministrar material asfáltico a la barra de aspersión. El sistema de circulación, que consiste en una bomba accionada por motor o hidráulicamente, realiza lo siguiente:

- Llena el tanque del distribuidor.
- Hace circular el material a través de la barra y el tanque.
- Dispersa el material a través de la barra o la lanza manual.
- Retorna el material al tanque desde la barra o la lanza manual.
- Bombea el material del tanque hacia el almacenamiento externo.
- Transfiere el material de un tanque de almacenamiento a otro

El sistema de circulación en un distribuidor es capaz de manejar productos con un rango de viscosidades, temperaturas y tasas de aplicación. Los ligantes pesados y rígidos requieren calentamiento a temperaturas de aspersión más altas y pueden requerir un sistema de bomba y calentador de trabajo pesado. Un sistema de barras de aspersión con boquillas aplica el asfalto a la superficie de la vía. El tipo de boquilla debe coincidir con el volumen y la viscosidad del material. Las barras de aspersión cubren anchos de hasta 30 pies (9.1 m) en una sola pasada.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 69. Distribuidor de Asfalto

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 70. Aplicación de Capa de Adherencia

La velocidad correcta de la bomba y la presión controlan el abanico de aspersión. Una presión demasiado baja puede resultar en estriado debido a una descarga no uniforme de material desde las boquillas individuales. Una presión demasiado alta, además de atomizar el asfalto, podría distorsionar el abanico de aspersión. Los fabricantes proporcionan tablas y datos sobre la velocidad o presión adecuada de la bomba para determinar el volumen por minuto de descarga para cada tamaño de boquilla.

Se utiliza un tacómetro como ayuda para mantener una velocidad uniforme del distribuidor. Los distribuidores más nuevos tienen interbloqueos entre la bomba de asfalto y la velocidad de avance del distribuidor. A medida que el distribuidor cambia de velocidad, la velocidad de la bomba se ajusta automáticamente para compensar el cambio de velocidad del distribuidor, manteniendo así una tasa de aplicación constante. Debido a todas estas variables, es importante garantizar una aplicación adecuada y uniforme de la capa de adherencia mediante verificaciones rutinarias o comprobaciones de calibración de cada distribuidor individual, con recalibraciones según sea necesario. Como mínimo, se recomienda calibrar los distribuidores anualmente. Una norma que resulta útil para la calibración es ASTM D-2995, "Práctica Estándar para Estimar la Tasa de Aplicación y la Tasa de Aplicación Residual de Distribuidores Bituminosos".

5.5.4.1 Carga del Distribuidor: Consideraciones de Seguridad

Los operadores de distribuidores y aquellos responsables de cargar los diversos materiales en el distribuidor deben tener precaución para evitar escenarios peligrosos. La Tabla 7 ofrece una guía para cargar productos de manera segura.

Tabla 7. Guía para la Carga de Productos

Último Producto en el Tanque	Producto a Cargar			
	Cemento Asfáltico	Asfalto Rebajado	Emulsión Catiónica	Emulsión Aniónica
Cemento Asfáltico	Okey para Cargar	Okey para Cargar	Vaciar a Cantidad No Medible	Vaciar a Cantidad No Medible
Asfalto Rebajado	Vaciar*	Okey para Cargar	Vaciar a Cantidad No Medible	Vaciar a Cantidad No Medible
Emulsión Catiónica	Vaciar*	Vaciar a Cantidad No Medible	Okey para Cargar	Vaciar a Cantidad No Medible
Emulsión Aniónica	Vaciar*	Vaciar a Cantidad No Medible	Vaciar a Cantidad No Medible	Autorizado para Cargar
Aceite Crudo o Aceites Combustibles Residuales	Vaciar*	Vaciar a Cantidad No Medible	Vaciar a Cantidad No Medible	Vaciar a Cantidad No Medible
Cualquier Producto No Listado	El Tanque Debe ser Limpiado	El Tanque Debe ser Limpiado	El Tanque Debe ser Limpiado	El Tanque Debe ser Limpiado

*Cualquier material restante será peligroso.

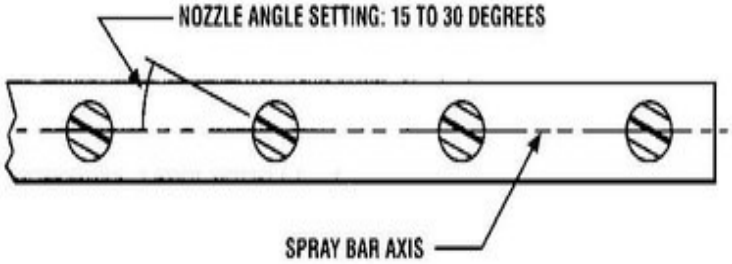
Fuente: Instituto del Asfalto

5.5.4.2 Configuración del Distribuidor

Una de las partes más importantes del distribuidor es la barra de aspersión. La barra de aspersión está montada en la parte posterior del distribuidor y está compuesta por una serie de boquillas de aspersión espaciadas uniformemente (es decir, cada 4 pulgadas [100 mm]) a lo largo de la barra. Es esencial que la barra de aspersión tenga presión y temperatura constantes a lo largo de todo el ancho para obtener una descarga igual de todas las boquillas. Para lograr esto, la barra de aspersión está equipada con una línea de retorno para la circulación continua de material calentado y presurizado. La mayoría de los modelos están equipados con válvulas de cierre en cada boquilla, o grupos de boquillas, para optimizar un patrón de aspersión o para asperjar áreas irregulares.

El distribuidor debe configurarse adecuadamente para aplicar la tasa de aplicación deseada de manera uniforme en toda la longitud y el ancho del área a tratar con adherencia. La configuración adecuada incluye asegurar el tamaño, espaciamiento y orientación correctos de las boquillas en la barra de aspersión; la altura de la barra de aspersión; y la velocidad del distribuidor. La selección adecuada de boquillas es imprescindible para una aplicación consistente y uniforme de los materiales. Se recomienda a los usuarios consultar con el fabricante de su equipo para obtener orientación sobre la selección de boquillas.

Antes del uso, las boquillas deben verificarse para detectar daños y una configuración adecuada. El ángulo del eje longitudinal de las aberturas de las boquillas (ver Figura 71) debe ajustarse de modo que los abanicos de aspersión no interfieran entre sí. El ángulo de la boquilla varía según la marca del distribuidor, pero típicamente está entre 15 y 30 grados. Es importante que todas las boquillas estén configuradas en el mismo ángulo.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 71. Alineación Adecuada de las Boquillas

Algunos operadores configurarán las boquillas de los extremos en un ángulo diferente (de 60 a 90 grados con respecto a la barra de aspersión) para intentar obtener un borde recto y definido. Esta práctica no debe permitirse ya que producirá una franja gruesa en el borde y privará al abanico de aspersión adyacente del traslape de esta boquilla. El uso de una boquilla especial de extremo configurada en el mismo ángulo que todas las demás boquillas proporcionará una cobertura más uniforme y producirá un mejor borde.

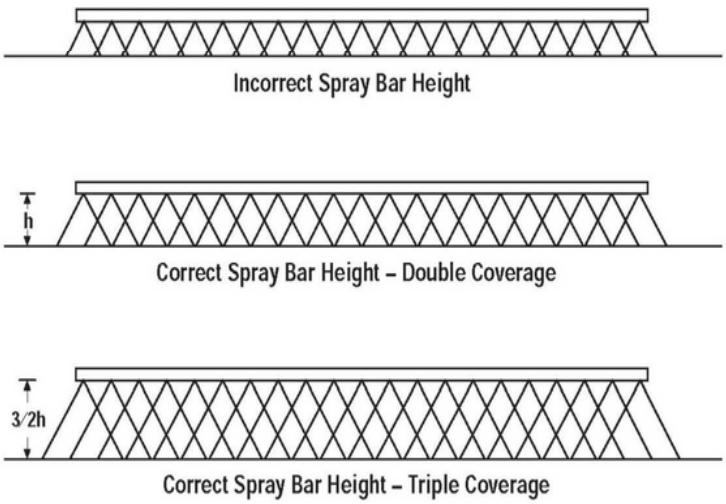
Ajustar la altura de la barra de aspersión para obtener una cobertura uniforme del material de la capa de adherencia es un paso crítico en la configuración del distribuidor. La barra de aspersión debe configurarse para obtener un traslape triple o, como mínimo, doble (cobertura). La elección de cuál de estas coberturas es mejor para un escenario dado se basa en muchos factores. Independientemente de la opción que se utilice, la altura de la barra de aspersión debe ajustarse con precisión para evitar cualquier estriado en la aplicación de la capa de adherencia que pueda causar una distribución de la cobertura

desigual de la capa de adherencia (ver Figura 72). Las barras de aspersión configuradas demasiado altas pueden resultar en distorsión por el viento. Una buena práctica es configurar la altura de la barra de aspersión para obtener una cobertura de traslape triple. Con las boquillas a centros de 4 pulgadas (100 mm), se requiere una altura de barra de 12 pulgadas (300 mm) sobre el suelo para lograr un traslape triple.

El distribuidor debe configurarse adecuadamente para aplicar la tasa de aplicación deseada de manera uniforme en toda la longitud y el ancho del área a tratar con adherencia.
La configuración adecuada incluye asegurar el tamaño, espaciamiento y orientación correctos de las boquillas en la barra de aspersión; la altura de la barra de aspersión; y la velocidad del distribuidor.

Sin embargo, la adherencia ("tack") es una aplicación muy ligera que puede requerir boquillas de orificio más pequeño para desarrollar abanicos de pulverización agradables y completos, especialmente cuando se utiliza triple solapamiento. Además, normalmente se necesitan mayores velocidades de avance para aplicar la tasa de aplicación deseada. Las boquillas de orificio más pequeño tienden a obstruirse más fácilmente, y las velocidades de avance más rápidas no siempre son deseables en una zona de construcción. A veces es necesario un solapamiento doble o una cobertura simple utilizando boquillas más grandes y velocidades más lentas. Aunque no es lo preferido, la mayoría de los inspectores parecen aceptar variaciones como disparar una de cada dos o una de cada tres boquillas, junto con ajustes de la altura de la barra y del ángulo de la boquilla, siempre que el resultado sea una cobertura uniforme y se mantenga la tasa de aplicación.

Para obtener mejores resultados, la altura de la barra de pulverización por encima de la superficie de la carretera no debe variar más de 1/2 pulgada (12,5 mm) durante la aplicación. Se deben tomar medidas adicionales para garantizar que no se infrinja esta máxima variación de altura permisible a medida que la carga aligera la suspensión del camión distribuidor. La mayoría de los distribuidores ahora cuentan con controles mecánicos automatizados para mantener la altura adecuada.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 72. Traslape del Abanico de Aspersión

5.5.4.3 Determinación de la Temperatura de Aplicación de la Emulsión

Las recomendaciones para las temperaturas de aspersión de emulsiones asfálticas generalmente están en el rango de 120–180 °F (50–80 °C). Para capas de adherencia específicamente, estar en las porciones superiores de este rango reduce el tiempo de rotura de la emulsión, lo que acelera el proceso de construcción. Se recomienda revisar las especificaciones locales y las recomendaciones del proveedor del material para situaciones individuales.

5.5.4.4 Verificación de las Tasas de Aplicación

Es importante verificar la tasa de aplicación final de la capa de adherencia aplicada para compararla con la tasa especificada (ver tasas recomendadas en la Sección 5.5.2). Esta sección cubre el cálculo de la tasa residual de la capa de adherencia de la emulsión aplicada. Las tasas de aplicación se expresan con mayor frecuencia como un volumen por área, como galones/yarda cuadrada o litros/metro cuadrado, pero también pueden expresarse en términos de masa como libras/yarda cuadrada o kilogramos/metro cuadrado. Los especificadores deben designar si el volumen a colocar es una tasa de ligante residual, tasa de emulsión o una tasa diluida específica.

Es importante verificar la tasa de aplicación final de la capa de adherencia aplicada para compararla con la tasa especificada.

5.5.4.5 Cálculo de la Tasa de Aplicación por Volumen

Los cálculos para determinar las aplicaciones de capas de adherencia son bastante sencillos. Los volúmenes de todos los materiales asfálticos cambian con la temperatura; por lo tanto, se requiere una temperatura estándar para determinar los volúmenes apropiados utilizados. El volumen de las emulsiones asfálticas se reporta a 60 °F (15.5 °C), por lo tanto, las tasas de aplicación especificadas mostradas en la Tabla 5 y la Tabla 6 utilizan volúmenes a 60 °F (15.5 °C). La Tabla 8 proporciona las correcciones necesarias de temperatura-volumen para convertir volúmenes a otras temperaturas al volumen estándar de 60 °F (15.5 °C).
Los cálculos de la tasa de aplicación de asfalto residual deben tener en cuenta no solo la temperatura, sino también el agua que está presente en una emulsión sin diluir y cualquier agua añadida durante la dilución. Los siguientes pasos pueden ser útiles al calcular la tasa de aplicación de la capa de adherencia por volumen en galones/yarda cuadrada:

Paso 1: *Determinar la distancia recorrida.*

Paso 2: *Calcular el área cubierta = distancia recorrida X ancho asperjado. (convertir de pies cuadrados a yardas cuadradas si es necesario).*

Paso 3: *Calcular los galones de material aplicado = volumen inicial — volumen final. Los volúmenes pueden determinarse usando una varilla medidora calibrada al tanque del camión (mucho más preferible), o medidores a bordo.*

Paso 4: *Corregir la temperatura de regreso a 60°F aplicando el factor de corrección.*

Paso 5: *Considerar cualquier dilución.*

Paso 6: *Calcular el asfalto residual teniendo en cuenta el agua en la emulsión original.*

Paso 7: *Calcular la tasa de aplicación de asfalto residual, que es los galones de asfalto residual aplicado divididos por el área de aplicación.*

Los mismos pasos pueden utilizarse para calcular la tasa de la capa de adherencia por volumen en L/m².

5.5.4.6 Cálculo de la Tasa de Aplicación por Masa

Las tasas de aplicación también pueden calcularse utilizando la masa del producto aplicado. La mayoría de los fabricantes de emulsiones mostrarán el peso por galón a 60 °F en el documento de embarque que acompaña el envío. Cuando se dispone de básculas, la masa del distribuidor puede determinarse antes y después de la aplicación para determinar la cantidad de material rociado. Tenga en cuenta que no se necesita una corrección de temperatura al calcular por masa, ya que los cambios de temperatura no afectan la masa de los materiales. El proceso de cálculo es muy similar a los pasos mostrados anteriormente.

Los cálculos de la tasa de aplicación (tasa de aspersión) por masa son los siguientes:

Paso 1: *Determinar la distancia recorrida.*

Paso 2: *Calcular el área cubierta, multiplicar la distancia recorrida por el ancho asperjado. (Convertir de pies cuadrados a yardas cuadradas si es necesario).*

Paso 3: *Calcular la masa de emulsión diluida aplicada.*

Paso 4: *Calcular la masa de emulsión sin diluir. Este cálculo asume que el peso unitario de la emulsión diluida es equivalente al peso unitario de la emulsión sin diluir.*

Paso 5: *Calcular los galones de emulsión utilizados.*

Paso 6: *Calcular la aplicación de asfalto residual.*

Los mismos pasos pueden utilizarse para calcular la tasa de la capa de adherencia por masa en L/sq m.

°C	°F	Multiplier	°C	°F	Multiplier	°C	°F	Multiplier
17.8	64	0.99900	45.6	114	0.98650	73.3	164	0.97400
18.3	65	0.99875	46.1	115	0.98625	73.9	165	0.97375
18.9	66	0.99850	46.7	116	0.98600	74.4	166	0.97350
19.4	67	0.99825	47.2	117	0.98575	75.0	167	0.97325
20.0	68	0.99800	47.8	118	0.98550	75.6	168	0.97300
20.6	69	0.99775	48.3	119	0.98525	76.1	169	0.97275
21.1	70	0.99750	48.9	120	0.98500	76.7	170	0.97250
21.7	71	0.99725	49.4	121	0.98475	77.2	171	0.97225
22.2	72	0.99700	50.0	122	0.98450	77.8	172	0.97200
22.8	73	0.99675	50.6	123	0.98425	78.3	173	0.97175
23.3	74	0.99650	51.1	124	0.98400	78.9	174	0.97150
23.9	75	0.99625	51.7	125	0.98375	79.4	175	0.97125
24.4	76	0.99600	52.2	126	0.98350	80.0	176	0.97100
25.0	77	0.99575	52.8	127	0.98325	80.6	177	0.97075
25.6	78	0.99550	53.3	128	0.98300	81.1	178	0.97050
26.1	79	0.99525	53.9	129	0.98275	81.7	179	0.97025
26.7	80	0.99500	54.4	130	0.98250	82.2	180	0.97000
27.2	81	0.99475	55.0	131	0.98225	82.8	181	0.96975
27.8	82	0.99450	55.6	132	0.98200	83.3	182	0.96950
28.3	83	0.99425	56.1	133	0.98175	83.9	183	0.96925

Fuente: Instituto del Asfalto

5.6 RESUMEN

A la hora de supervisar las operaciones de preparación de superficies, deben tenerse en cuenta los siguientes factores clave:

- Por lo general, no es necesario aplicar una capa de imprimación sobre el suelo de la subcapa, a menos que la subcapa preparada con el contenido de humedad adecuado no se vaya a pavimentar durante varias semanas. existen diferencias de opinión sobre las ventajas de utilizar una capa de imprimación en una capa base granular, pero en muchos casos se puede eliminar la capa de imprimación sin que ello afecte negativamente al rendimiento de la estructura del pavimento, especialmente cuando la estructura del pavimento que se va a colocar sobre la capa de base es relativamente delgada, quizás de 7-8 pulgadas (140-200 mm). En pavimentos más delgados, la capa de imprimación cobra mayor importancia.
- Antes de pavimentar una superficie existente, cualquier defecto en la superficie del pavimento existente debe eliminarse y sustituirse o repararse mediante parches.
- Si hay grietas en una superficie de pavimento asfáltico existente, por lo general deben sellarse individualmente, o bien se puede aplicar algún tipo de tratamiento superficial a toda la superficie de la carretera. También es muy habitual eliminar la superficie deteriorada mediante fresado antes de recubrirla. Las juntas del pavimento de hormigón de cemento Portland (PCC) que estén mal selladas deben fresarse y sellarse. Las losas de PCC que se balancean deben estabilizarse.
- Una superficie de asfalto irregular y con baches debe nivelarse con mezcla asfáltica (utilizando una pavimentadora para colocar la mezcla) para rellenar los

puntos bajos de la superficie, o bien debe fresarse para crear una superficie uniforme y eliminar los desperfectos superficiales.

- Una vez completadas las reparaciones necesarias, se debe limpiar la superficie del pavimento para eliminar todo el polvo, la suciedad y otros residuos. Esto se debe realizar pasando varias veces una barredora mecánica. Si la barredora no elimina toda la suciedad acumulada, puede ser necesario limpiar con aire o agua a presión.
- La aplicación de una capa de adherencia debe realizarse antes de construir una capa de recubrimiento sobre una superficie existente de asfalto o PCC.
- Una configuración adecuada del distribuidor es fundamental para la aplicación correcta de la capa de adherencia. Se debe comprobar el distribuidor utilizado para asegurarse de que todas las boquillas estén abiertas y ajustadas en el ángulo correcto, y que la barra de pulverización se encuentre a la altura adecuada sobre la superficie del pavimento.
- La tasa de aplicación de la capa de adherencia debe basarse en la cantidad residual deseada de cemento asfáltico en la superficie de la carretera, que debe estar entre 0,040 y 0,070 galones/yarda cuadrada (0,181 y 0,317 litros/metro cuadrado) para superficies normales. La tasa de aplicación también debe basarse en la cantidad real de cemento asfáltico en la emulsión, independientemente de si la emulsión se diluye o no antes de su aplicación. Por ejemplo, una emulsión SS-1 sin diluir debe aplicarse desde el distribuidor a una tasa de 0,060 galones/yarda cuadrada (0,271 l/m²) para obtener 0,040 galones/yarda cuadrada (0,181 l/m²) de asfalto residual en la superficie del pavimento.
- Los pavimentos fresados pueden necesitar una mayor cantidad de capa adhesiva residual. Una capa adhesiva demasiado escasa no proporcionará la unión necesaria entre las capas antigua y nueva. Por otro lado, una capa adhesiva excesiva puede favorecer el deslizamiento de la nueva capa sobre el pavimento antiguo o el sangrado del material adhesivo a través de una capa fina.
- La mezcla asfáltica debe colocarse sobre una capa adhesiva de emulsión que se haya roto, es decir, que haya cambiado de color marrón a negro. La capa adhesiva no debe ser recogida ni arrastrada por los camiones de transporte.
- La capa de adherencia no debe quedar expuesta al tráfico. Si fuera necesario hacerlo, se deben tomar las precauciones adecuadas, como reducir el límite de velocidad establecido en la carretera y esparcir arena sobre la superficie, retirando el exceso con una escoba.
- Se debe aplicar una capa de adherencia entre las capas de asfalto nuevo. La cantidad de asfalto residual en la nueva superficie de la carretera debe ser aproximadamente la mitad de la adecuada para una superficie de pavimento antigua, compacta y existente.

6. Entrega de la mezcla

6.1 INTRODUCCIÓN

Tras la producción de mezclas asfálticas en la planta de asfalto, estos materiales se cargan en vehículos de transporte y remolques, ya sea directamente o después de haber sido almacenados durante un breve periodo de tiempo en un silo o depósito intermedio. El objetivo de esta fase del proceso de pavimentación es proporcionar un suministro constante, regular e ininterrumpido de materiales homogéneos y uniformes. El cumplimiento de este objetivo ayuda a garantizar que la pavimentadora pueda avanzar a una velocidad constante durante toda la jornada de pavimentación. La experiencia ha demostrado que una pavimentadora que funciona a una velocidad constante sin paradas produce el pavimento más liso y duradero.

6.2 PLANIFICACIÓN

El proceso de planificación de un trabajo de pavimentación incluye determinar el número de camiones necesarios y asegurarse de que los conductores de los camiones estén debidamente capacitados. El tamaño y los tipos de camiones disponibles, el tiempo que se tarda en hacer un viaje desde la planta hasta la pavimentadora y volver (lo que se conoce como tiempo de ciclo), la tasa de producción por hora prevista de la planta, la duración del turno de pavimentación y cualquier mezcla almacenada al comienzo de la jornada laboral son detalles que el contratista de pavimentación debe tener en cuenta para planificar adecuadamente sus necesidades de transporte. Además, los conductores deben estar capacitados en su función adecuada en la carga en la planta, el transporte y la descarga en la pavimentadora para minimizar la segregación, garantizar la seguridad y promover la pavimentación continua.

El tiempo de ciclo incluye todos los pasos que forman parte de un ciclo completo. Esto puede incluir el tiempo necesario para cargar y etiquetar el camión, cubrir la carga con una lona, transportarla al lugar de pavimentación, esperar en el lugar para descargar, volcar y limpiar, y regresar a la planta.

Si un turno comienza con material de pavimentación almacenado en un silo, ese material aumenta efectivamente la capacidad de producción del contratista. La cantidad de capacidad añadida viene determinada por la cantidad almacenada y la duración del turno. Por ejemplo, si un turno de 10 horas comienza con 250 toneladas de mezcla en un silo, esto equivale a 25 toneladas/hora (250 toneladas/10 horas) de capacidad de producción adicional. Por lo tanto, la producción real será las toneladas/hora producidas por la planta más las toneladas/hora añadidas suministradas desde el silo.

La determinación del número mínimo de camiones necesarios es un aspecto importante de la planificación de un proyecto de pavimentación asfáltica. Los elementos mencionados anteriormente son necesarios para estimar adecuadamente este requisito. El número mínimo de camiones necesarios se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\textbf{Unidades de Transporte (camiones)} = \frac{\textbf{Planta de producción}\left(\frac{\textbf{T}}{\textbf{hr}}\right)}{\textbf{Carga proomedio}\left(\frac{\textbf{T}}{\textbf{camión}}\right)} * \textbf{ciclo de tiempo (min)} * \frac{\textbf{hr}}{\textbf{60 min}}$$

Donde:

T = toneladas
hr = horas
min= minutos

La respuesta siempre se redondea al alza. Por ejemplo, si la ecuación da como resultado 13,1 camiones, se necesitarán como mínimo 14 camiones.

EJEMPLO

Determine el número mínimo de ca
información:

Arrancar y detener la pavimentadora cada vez que llega un camión al proyecto reducirá la uniformidad y la calidad del pavimento acabado y afectará negativamente a la

Producción de la planta =	/h)
Carga del silo al inicio del día =	200 T (180 toneladas)
Duración del turno =	10 horas
Capacidad del camión =	20 T (18 toneladas)
Tiempo de carga y emisión de tickets =	4 minutos
Tiempo de cubrición =	2 minutos
Transporte al lugar de trabajo =	35 minutos
Tiempo en el lugar =	4 min
Descarga y limpieza =	4 min
Transporte de vuelta =	35 min

Paso 1: Determinar la tasa de producción real de la planta

Esta será la tasa de producción añadida por el uso de los materiales almacenados en el silo al comienzo del turno más la tasa de producción de la planta. En este ejemplo, hay 200 toneladas almacenadas que se utilizarán durante una jornada laboral de 10 horas.

$$\frac{200\ T}{10\ hr} + 250\frac{T}{hr} = 270\frac{T}{hr}$$

Paso 2: Determinar el tiempo total del ciclo

El tiempo total del ciclo será la suma de cada uno de los pasos que se realizan desde la carga hasta el regreso de un solo camión: 84 minutos en total.

Paso 3: Calcular el número total de camiones necesarios:

$$\textbf{Unidades de Transporte (camiones)} = \frac{270\ \left(\frac{T}{hr}\right)}{20\ \left(\frac{T}{camion}\right)} * 84\ (min) * \frac{hr}{60\ min} = 18.9\ camiones$$

Este número siempre debe redondearse al alza. Por lo tanto, se necesitarán 19 camiones para mantener un flujo adecuado de mezcla hacia la obra.

El intervalo de tiempo entre cada entrega debe ser constante, y no se debe permitir que los camiones se agrupen en la pavimentadora o en la planta. Si se produce una

interrupción en la entrega de material, el contratista de la pavimentadora debe detener la pavimentadora utilizando una técnica de parada rápida y, a continuación, utilizar un arranque rápido cuando haya suficientes camiones en la obra. Este método favorecerá la pavimentación continua. Arrancar y detener la pavimentadora cada vez que llega un camión al proyecto reducirá la uniformidad y la calidad del pavimento acabado y afectará negativamente a la densidad de la capa.

6.3 TIPOS DE CAMIONES

Se utilizan tres tipos principales de camiones para los trabajos de pavimentación con asfalto: los de descarga trasera, los de descarga inferior o ventral y camión de fondo móvil.
Independientemente del tipo de camión o remolque, el suelo de la unidad de transporte debe ser liso y no presentar hoyuelos que puedan provocar la acumulación de agentes desmoldantes. Las paredes laterales de la caja también deben ser rectas para evitar que el material se quede colgado durante la descarga. En general, la plataforma del camión debe estar limpia, bien mantenida, en buenas condiciones y ser capaz de transportar el material de forma segura y legal hasta el lugar de trabajo. El dispositivo de elevación de las plataformas volcadoras debe mantenerse de forma que la plataforma pueda elevarse para mover continuamente el material desde la plataforma del camión hasta la tolva de la pavimentadora. Todas las unidades de transporte deben ser supervisadas continuamente para detectar signos de problemas mecánicos o fugas de líquidos (excepto el condensado del aire acondicionado) que puedan dañar el asfalto. Si se detectan problemas, la unidad de transporte debe retirarse inmediatamente de la fila hasta que se puedan realizar las reparaciones.

6.3.1 Camiones volquetes traseros

El camión volquete trasero entrega la mezcla directamente a la tolva de la pavimentadora o a un MTV (véase la figura 73). Estos camiones pueden tener de tres a seis ejes y una capacidad de 12 a 20 toneladas (11 a 18 toneladas métricas). Cuantos más ejes, mayor es la capacidad. La ventaja del camión volquete trasero es su corta distancia entre ejes, lo que facilita su maniobrabilidad. El camión volquete trasero también puede ser un semirremolque, que es esencialmente un camión volquete articulado de gran tamaño, con una capacidad de 20 a 25 toneladas (18 a 23 toneladas métricas). Las dos desventajas de este tipo de camión son que requiere una mayor habilidad por parte del operador y que su gran caja de descarga puede causar problemas con obstáculos aéreos (cables, puentes y árboles). Debido al tamaño de este camión, se debe tener especial cuidado al cargarlo, ya que existe un mayor riesgo de segregación de los áridos. Especialmente en el caso de los volquetes traseros más grandes, se debe tener cuidado de evitar que la caja del camión presione contra la pavimentadora. Esto es más probable que ocurra cuando la caja está en su punto más alto.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 73. Camión volquete trasero

6.3.2 Camiones volquete de descarga inferior

Los remolques volquete de descarga inferior (a menudo denominados camiones volquete de descarga ventral) se utilizan cuando se emplea el pavimentado en hileras (véase la figura 74). El pavimentado en hileras es un proceso en el que la mezcla asfáltica se coloca directamente sobre la calzada delante de la pavimentadora, que está equipada con una máquina recogedora (también conocida como elevador de hileras) que recoge el material apilado en hileras y lo introduce en la tolva de la pavimentadora. Este elevador de hileras puede ser una unidad independiente o estar conectado directamente a la pavimentadora.

Los camiones volquete inferiores o de descarga lateral suelen requerir que un operario se sitúe en la pendiente para abrir las compuertas y controlar la velocidad de esparcimiento del material asfáltico sobre la pendiente delante de la extendedora. El operario del volquete es responsable de mantener la cantidad adecuada de material para que la tolva de la extendedora se cargue de manera uniforme. La hilera debe tener un tamaño uniforme de un camión a otro. Durante la pavimentación, si se comprueba que la cantidad en la pendiente no coincide con el ancho o la profundidad de la pavimentación, se debe añadir o retirar material sin detener la pavimentadora. El operador del volquete debe estar capacitado para supervisar también la profundidad del material en la tolva, a fin de garantizar que se suministre el volumen adecuado de material. Debe ajustar el volumen de descarga si es necesario para equilibrar adecuadamente las necesidades del proyecto de pavimentación.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 74. Camión volquete delantero

6.3.3 Camiones con fondo móvil

Los camiones con fondo móvil (también conocidos como camiones de descarga horizontal o flow-boy) cuentan con un sistema transportador que traslada el material desde la unidad de transporte directamente a la tolva de la pavimentadora sin necesidad de elevar la plataforma del camión (véase la figura 75). Este sistema tiene una ventaja en materia de seguridad, ya que no es necesario elevar la plataforma, por lo que no es propenso a interactuar con peligros aéreos, como las líneas de servicios públicos. La segregación se reduce al mínimo, ya que el material se traslada en masa en el sistema transportador o en el sistema de fondo móvil a medida que se descarga en la tolva de la pavimentadora. Además, este tipo de camión no ejerce presión sobre la tolva de la pavimentadora, como puede ocurrir con los volquetes traseros.

Una limpieza adecuada de la cinta transportadora o de las placas de descarga garantiza que no queden trozos fríos en la caja del camión. Las comprobaciones diarias entre cargas garantizan que el sistema esté operativo y que ningún componente suelto o dañado se rompa durante la jornada laboral.

Fuente: Instituto del Asfalto

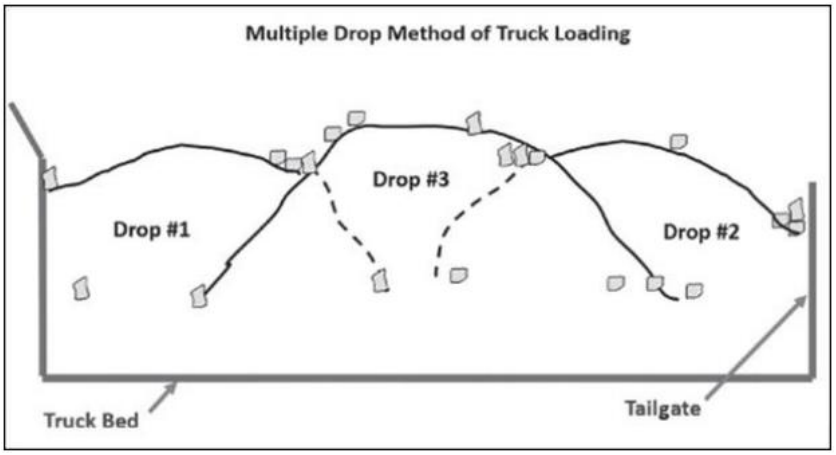
Figura 75. En acción – camión volquete

6.4 CARGA ADECUADA DEL CAMIÓN

La segregación (tanto física como térmica) es muy difícil de manejar en la pavimentadora, ya que estas no están diseñadas para volver a mezclar los materiales. Por lo tanto, los procedimientos utilizados para transferir la mezcla asfáltica al vehículo de transporte son fundamentales para minimizar la segregación.

El uso de las mejores prácticas durante la carga puede reducir drásticamente la posibilidad de segregación. Reducir la distancia de caída libre, cuando sea posible, ayudará a prevenir la segregación. La descarga de la mezcla debe realizarse siempre en masa y caer directamente en vertical en el camión. Los camiones se cargan desde una compuerta de descarga situada en la parte inferior de los silos de almacenamiento de una planta de tambor o de mezcla, o, en algunas plantas de mezcla, directamente desde la compuerta de descarga.

El número de toneladas cargadas y el número de descargas variarán en función del tamaño y la capacidad del camión. Se recomienda evitar cargar con una sola descarga, ya que esto provocará la segregación del material y hará que los áridos más grandes rueden hacia la parte delantera y trasera de la plataforma del camión. Como se ilustra en la figura 76, se recomienda un mínimo de tres descargas. Es recomendable cargar el camión con varias descargas de aproximadamente la misma cantidad de material. El camión se mueve hacia adelante y hacia atrás para que las cargas se coloquen en una secuencia específica, con la primera descarga en la parte delantera de la plataforma del camión, la segunda descarga en la puerta trasera y las descargas posteriores en el centro de la plataforma



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 76. Ejemplo de carga de camión

Para los camiones volquetes estándar, normalmente bastan tres descargas. Las cajas de camión más largas requerirán más descargas para evitar la segregación (normalmente un número impar de descargas). Para facilitar la carga, se pueden marcar estaciones en el lateral de la zona de carga para que el operador de la planta pueda indicar al camión dónde detenerse. Cargar el camión con múltiples descargas para reducir la longitud de la cara del montón y, por lo tanto, reducir la distancia de rodadura del agregado, minimizará la segregación física.

6.5 PROCEDIMIENTOS DE TRANSPORTE

Una vez cargados los vehículos de transporte en la planta, deben dirigirse directamente al lugar de pavimentación. Es importante que los conductores de camiones reciban una formación exhaustiva para que sean conscientes de lo que se espera de ellos durante la carga, el transporte y la descarga, con el fin de mantener un flujo constante de mezcla asfáltica hacia la pavimentadora. Los camiones de transporte no deben llegar simultáneamente con otros camiones de transporte (agrupándose o formando pelotones). Una excepción notable es el trabajo de pavimentación de aeródromos militares, donde puede ser necesario realizar entregas en pelotón para entrar y salir de las instalaciones que se están pavimentando por razones de seguridad. La formación de los conductores debe centrarse en las entregas seguras y puntuales como elementos clave en la construcción de un pavimento asfáltico de calidad.

Todas las plataformas de los camiones de transporte deben estar lisas y limpias. Se debe inspeccionar la limpieza de las plataformas de los camiones antes de cargarlas con mezcla fresca. La plataforma del camión de transporte debe estar libre de todo material perjudicial antes de colocar la mezcla en ella. Se deben eliminar los residuos que queden en la caja del camión tras su uso anterior. La caja también debe estar razonablemente lisa y libre de hendiduras o depresiones importantes en las que puedan acumularse el agente desmoldante de la caja del camión y la mezcla. El borde de descarga debe limpiarse entre cada carga y los dispositivos de cierre de la puerta trasera deben lubricarse para que se liberen cuando se les ordene.

6.5.1 Agentes desmoldantes

Una vez que la caja del camión de transporte esté limpia, debe recubrirse con un agente desmoldante para evitar que la mezcla de asfalto se adhiera a la caja. Para este fin, deben

utilizarse materiales no derivados del petróleo. Aunque el combustible diésel era antes el agente desmoldeante más utilizado, ahora ya no está permitido y no debe utilizarse, ya que daña la mezcla. Los agentes desmoldeantes modernos son compuestos químicos patentados que se suministran en forma concentrada y se diluyen con agua hasta alcanzar la concentración adecuada para su aplicación. La mayoría de las agencias disponen de una «lista de productos aprobados» para agentes desmoldeantes. Deben respetarse las proporciones de dilución y aplicación indicadas por los fabricantes para garantizar un buen rendimiento.

El agente desmoldeante debe pulverizarse uniformemente sobre los laterales y el fondo de la plataforma del camión, utilizando la cantidad mínima necesaria para cubrir la superficie de la plataforma sin que se produzcan escorrentías. Cualquier exceso de agente debe drenarse de la plataforma antes de cargar el camión con la mezcla. Es importante controlar la eficacia del agente desmoldeante con el tipo de ligante y la mezcla que se utilicen. Si los camiones requieren una limpieza excesiva después de cada entrega, puede ser conveniente utilizar un agente desmoldeante diferente.

6.5.2 Lonas y camas aislantes

Es imprescindible mantener la temperatura de la mezcla de la planta durante su transporte desde la planta hasta el lugar de pavimentación. Si se producen diferencias de temperatura en la mezcla de 25 °F (14 °C) o más, se considera que la mezcla se ha segregado térmicamente. Los días más fríos y/o los transportes más largos aumentan la probabilidad de que esto ocurra. Lo ideal es que todos los camiones tengan plataformas aisladas y una cubierta impermeable aislante (también conocida como lona) que cubra tanto los laterales como la parte trasera de la plataforma para mantener el flujo de aire y el agua de lluvia alejados de la mezcla asfáltica (véase la figura 77). El solapamiento debe ser de al menos 1 pie (0,3 m). El aislamiento debe estar tanto en los laterales como en el fondo de las plataformas. Estas características ayudan a combatir la segregación térmica. Algunas agencias exigen el uso de lonas independientemente de las condiciones meteorológicas.

Fuente: Tim Murphy

Figura 77. Tolva cubierta con Carpa

para este propósito. Aunque el diésel fue durante mucho tiempo el agente desmoldante más utilizado, actualmente su uso está prohibido y no debe emplearse, ya que deteriora la mezcla. Los agentes desmoldantes modernos son compuestos químicos comerciales que se suministran en forma concentrada y se diluyen con agua hasta alcanzar la concentración adecuada para su aplicación. La mayoría de las agencias cuentan con una "lista de productos aprobados" para agentes desmoldantes. Es indispensable seguir las tasas de dilución y aplicación indicadas por el fabricante para garantizar un buen desempeño.

El agente desmoldante debe rociarse de manera uniforme sobre los laterales y el fondo de la tolva del camión, utilizando la cantidad mínima necesaria para cubrir el área superficial sin que exista escurrimiento. Cualquier exceso de agente debe drenarse de la tolva antes de cargar la mezcla. Es importante supervisar la efectividad del agente desmoldante según el tipo de ligante y la mezcla que se esté utilizando. Si los camiones requieren limpieza excesiva después de cada entrega, podría ser necesario emplear un agente desmoldante diferente.

6.5.2 Lonas y Tolvas Aisladas

Mantener la temperatura de la mezcla en planta durante su transporte desde la planta hasta el sitio de pavimentación es imprescindible. Si se producen diferenciales de temperatura de 25 °F (14 °C) o más, la mezcla se considera térmicamente segregada. Los días más fríos y/o los recorridos más largos aumentan la probabilidad de que esto ocurra. Idealmente, todos los camiones deberían contar con tolvas aisladas y una cubierta impermeable aislante (conocida también como lona) que sobrepase los laterales y la parte posterior de la tolva para evitar el flujo de aire y la entrada de agua de lluvia en la mezcla asfáltica (ver Figura 77). El traslape debe ser de al menos 1 pie (0,3 m). El aislamiento debe ubicarse tanto en los laterales como en la parte inferior de las tolvas. Estas características ayudan a reducir la segregación térmica. Algunas agencias requieren el uso de lonas independientemente de las condiciones climáticas.

Fuente: Tim Murphy

Figura 77. Plataforma de camión cubierta con lona

6.5.3 Espaciamiento entre camiones

El objetivo del transporte en camiones es proporcionar un suministro constante, regularmente espaciado e ininterrumpido de un material uniforme y homogéneo. Un factor para lograr esto es determinar el espaciamiento ideal entre camiones. Este espaciamiento ideal puede determinarse a partir de las entradas usadas para calcular el número mínimo de camiones (ver Sección 6.2). Es decir, el tiempo total del ciclo dividido para el número real de camiones de acarreo utilizados debe indicar el espaciamiento adecuado entre camiones. Se reconoce que muchos factores externos, que están fuera del control del contratista, pueden intervenir una vez que el camión está en circulación y alterar este intervalo en tiempo real.

El objetivo del transporte en camiones es proporcionar un suministro constante, regularmente espaciado e ininterrumpido de un material uniforme y homogéneo.

Mantener el intervalo calculado y evitar la acumulación de camiones tanto en la planta de asfalto como en la pavimentadora puede ser un desafío significativo. Esto es especialmente cierto en proyectos de pavimentación urbana. La capacitación es fundamental. Es decir, capacitar a los conductores de camiones, al operador de planta, a la persona que dirige el descargue y al operador de la terminadora sobre por qué se busca esta uniformidad y qué hacer cuando se pierde. Cuando los camiones regresan a la planta en grupo, el operador de planta debe estar entrenado para mantener el intervalo correcto de carga, con el fin de restablecer el espaciamiento adecuado entre camiones. De manera similar, cuando un grupo de camiones llega al frente de pavimentación, tanto la persona encargada del descargue como el operador de la terminadora deben mantener su ritmo para restablecer el intervalo apropiado. La consistencia construye mejores carreteras y pavimentos aeroportuarios.

6.6 DESCARGA DE LA MEZCLA

Cuando los camiones de acarreo cargados llegan al frente de pavimentación, el siguiente paso es descargarlos transfiriendo la mezcla asfáltica a la pavimentadora. El uso de buenas prácticas para transferir la mezcla asfáltica desde el camión hacia la pavimentadora es necesario para garantizar que la operación de la terminadora sea continua y que la mezcla no se segregue durante el proceso de descarga.

El operador del volquete designada en obra controla la descarga de los camiones y ejerce una influencia significativa tanto en la uniformidad de la carpeta colocada como en el riesgo de segregación. El operador de la pavimentadora debe concentrarse en el proceso de extendido y no puede atender directamente problemas de comunicación con un conductor sin detener la máquina. Por esta razón, se recomienda contar con un operador del volquete debidamente capacitado.

El procedimiento de descarga variará naturalmente dependiendo del tipo de camión que se esté descargando. Por lo tanto, las siguientes secciones abordan la descarga directamente en la tolva de la pavimentadora, la pavimentación en hileras el uso de un Vehículo de Transferencia de Materiales (MTV).

6.6.1 Alimentación Directa a la Pavimentadora

Si se utiliza un camión de volteo trasero, la plataforma del camión debe elevarse una corta distancia para romper la carga hacia la parte trasera y permitir que la mezcla en la plataforma se desplace y deslice hacia atrás contra la compuerta antes de que esta se abra. Esta práctica hará que cualquier material de agregado grueso segregado se reincorpore a la masa de la mezcla en lugar de entregarse primero en la tolva de la pavimentadora. Una vez que la compuerta se abre, este procedimiento también permitirá que la mezcla se descargue del camión en una masa y que inunde la tolva de la pavimentadora, reduciendo aún más la posibilidad de segregación detrás de la regla del pavimentador. Además, elevar la plataforma antes de que el camión retroceda hacia la pavimentadora reduce el tiempo necesario para descargar el camión y hace que el intercambio de camiones sea más eficiente. El uso de cadenas en la compuerta trasera para controlar su apertura y reducir el flujo de mezcla está seriamente desaconsejado. Reducir el flujo de la mezcla a un chorro de movimiento lento podría resultar en una fuente importante de segregación. El mismo procedimiento debe emplearse, si es posible, cuando se utiliza un camión de fondo vivo para transportar la mezcla. En algunos de estos camiones, puede ser posible iniciar la banda o el transportador de tablillas durante unos segundos antes de que se abra la compuerta trasera del camión. Hacerlo creará una masa de material que puede ser entregada a la tolva, en lugar de permitir que cualquier partícula de agregado grueso que haya rodado hacia la compuerta salga primero hacia la tolva.

Para los camiones de volteo trasero y de fondo vivo, es imperativo que los camiones no retrocedan completamente hasta la pavimentadora, golpeándola. Golpear la pavimentadora creará una hendidura o un bulto en el manto que no podrá eliminarse con el rodillo. En cambio, estos camiones deben retroceder hasta quedar a una distancia de 12 a 18 pulgadas (300–450 mm) de la pavimentadora, según lo indique el encargado de descarga o el operador de la pavimentadora. En ese punto, el camión se detiene, suelta los frenos y espera a que la pavimentadora haga contacto.

Después de que la pavimentadora entra en contacto con la unidad de transporte, los rodillos de empuje montados en la parte frontal de la pavimentadora facilitan el movimiento del camión hacia adelante sin interferir con la rotación de las llantas del camión. Si se está utilizando un dispositivo de bloqueo de ruedas, este bloquea la unidad de transporte a la pavimentadora para evitar separación y derrames sobre la superficie, y simplifica la operación en terrenos irregulares. Una vez que el dispositivo de bloqueo de ruedas se activa, se debe indicar al conductor que eleve la plataforma de descarga y libere la compuerta trasera lo más rápido posible para llenar la tolva de la pavimentadora con un flujo inicial intenso.

Cuando no se utiliza un dispositivo de bloqueo de ruedas, el conductor experimentado del camión anticipará la repentina descarga de material hacia la tolva de la pavimentadora y aplicará brevemente una presión adicional en los frenos para evitar que la unidad de transporte sea empujada fuera de la tolva y derrame material sobre el pavimento directamente frente a la pavimentadora. Sin un dispositivo de bloqueo de ruedas, puede ser necesario que el conductor mantenga continuamente una ligera presión sobre los

Para los camiones de descarga trasera y de fondo vivo, es fundamental que los camiones no retrocedan completamente hasta la pavimentadora golpeándola. Golpear la pavimentadora creará una hendidura o un bulto en la carpeta que no podrá ser eliminado mediante el rodillo.

frenos para impedir que el camión se aleje de la pavimentadora mientras se vacía la carga. Esto es especialmente importante cuando se pavimenta en pendientes pronunciadas. Se recomienda brindar capacitación adicional a los conductores de camiones para minimizar estos inconvenientes.

6.6.2 Pavimentación en Hilera

Esta técnica de pavimentación coloca la mezcla en una hilera longitudinal sobre la superficie previamente nivelada, directamente frente a la pavimentadora, con el fin de facilitar una operación continua sin detenciones. Una máquina recolectora operada delante de la pavimentadora, levanta el material y lo descarga en la tolva. Estas operaciones se utilizan generalmente en climas cálidos y secos, donde la posibilidad de una lluvia inesperada que enfríe la mezcla expuesta es mínima.

El operador del volquete desempeña un papel fundamental para mantener una operación de pavimentación de calidad. Una adecuada gestión de la hilera permite mantener una velocidad continua de pavimentación, minimizando la segregación y la pérdida de temperatura. La cantidad de mezcla depositada sobre la superficie es controlada por el operador del camión durante la descarga, y el tamaño de la hilera se ajusta de acuerdo con el nivel de material en la tolva. Una cuadrilla bien capacitada puede pavimentar de manera continua durante horas, produciendo un pavimento de alta calidad sin interrupciones.

El proceso de formación de la hilera puede permitir la segregación de la mezcla, donde los agregados más gruesos tienden a acumularse en los bordes exteriores inferiores de la hilera. Por lo tanto, se deben tomar medidas para asegurar que el equipo recolector levante completamente la hilera y que cualquier material segregado sea redirigido hacia el centro del flujo a medida que pasa por el recolector y entra en la pavimentadora. La instalación de placas para forzar la mezcla hacia un flujo más estrecho, así como mantener un alto nivel de material en la tolva, ayuda a reducir la segregación.

Un proceso de descarga uniforme, calibrado según la producción de la planta y la velocidad de la pavimentadora, contribuye a mantener un espaciamiento adecuado entre camiones y una pavimentación continua. Una vez iniciado la hilera, cada camión debe retroceder y montarse sobre la sección transversal completa del material previamente colocado, de forma que se elimine la segregación entre cargas y se mantenga un tamaño uniforme de la hilera. No debe permitirse que más de una carga de mezcla permanezca expuesta a la intemperie en ningún momento.

6.6.2 Vehículo de transferencia de materiales

El MTV (ver Figura 78) se utiliza principalmente para transferir la mezcla desde el camión de acarreo hasta la tolva de la pavimentadora. El uso de un MTV ofrece varios beneficios, aunque incrementa el costo de la operación de pavimentación. Se ha demostrado que un MTV mejora la regularidad superficial y reduce la segregación de la mezcla. Por estas razones, su uso suele especificarse en pistas de aeropuertos y es requerido en muchos proyectos viales.

Cuando se usa correctamente, un MTV facilita la operación de pavimentación continua sin detenciones. El depósito de almacenamiento o cinta transportadora del MTV funciona como una tolva de compensación, pudiendo almacenar hasta 25 toneladas (23 toneladas métricas) de mezcla. Un inserto especial en la tolva de la pavimentadora permite almacenar 15 toneladas adicionales (14 toneladas métricas). Con el equivalente a dos o tres cargas adicionales de camión disponibles inmediatamente frente a la pavimentadora, este almacenamiento de material en sitio resulta sumamente valioso, ya que permite mantener la pavimentación continua incluso cuando hay retrasos en la llegada de camiones desde la planta.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 78. Vehículo de Transferencia de Materiales (MTV)

Cuando un MTV se queda sin material, la pavimentadora debe detenerse, y una operación continua ya no es posible. Por lo tanto, es necesario mantener un flujo constante de camiones frente al MTV para lograr una pavimentación verdaderamente continua. Si se produce un espacio entre camiones, el MTV debe detenerse antes de vaciarse por completo mientras espera la llegada del siguiente vehículo, de modo que se conserve una cantidad mínima de mezcla en los sinfines, capaz de mezclarse adecuadamente con el nuevo material descargado por el próximo camión. Además, la pavimentadora debe detenerse con la tolva a medio llenar, manteniendo así una cantidad constante de mezcla frente a la regla y asegurando la uniformidad y regularidad adecuada del manto de pavimento.

La carga de material en un MTV es similar a la carga de una pavimentadora tradicional. Se puede emplear descarga directa con camiones de volquete estándar, camiones de fondo vivo o mediante una operación de hilera.

Desplazar el MTV ligeramente fuera del carril que se está pavimentando también presenta ventajas importantes. En particular, esta práctica mantiene todos los vehículos de construcción fuera del carril de pavimentación, lo cual protege la capa de adherencia de contaminación o arrastre, mejorando así su desempeño. Operar un MTV de esta manera es, en general, un requisito en los proyectos de pavimentación de aeropuertos.

La masa de un MTV es bastante grande. Por lo tanto, es importante evaluar la capacidad del material existente para soportar esta carga sin sufrir daños. Especialmente en carreteras de bajo volumen, se recomienda actuar con precaución.

6.7 SEGUIMIENTO DE CANTIDADES

Ver Video:
Reportes, Emisión de Tickets y Seguimiento

Durante la carga de los camiones, la cantidad (normalmente expresada en toneladas) suele medirse y almacenarse electrónicamente como parte del registro permanente del proyecto. A cada carga se le emite un boleto individual numerado secuencialmente que normalmente incluye el tipo, cantidad y temperatura de la mezcla entregada, la hora de despacho, el total acumulado y la identificación del camión. Además, cualquier Hoja de Datos de Seguridad requerida puede imprimirse previamente en el reverso del boleto de entrega.

La cantidad de mezcla entregada desde la planta hasta el sitio de pavimentación puede determinarse mediante uno de los siguientes tres métodos:

Utilizar las básculas calibradas y certificadas de una planta por lotes. Usar el peso acumulado de los lotes individuales descargados directamente en un camión desde la amasadora o desde un silo de almacenamiento temporal.

Pesar los camiones cargados en básculas que puedan medir el peso del contenedor vacío y el peso neto de la mezcla. La báscula debe estar nivelada, horizontal y tener una longitud suficiente para pesar todos los ejes del camión a la vez.

Usar celdas de carga calibradas y certificadas, adosadas a las patas de soporte de un silo portátil, para acumular la resta del peso a medida que el camión es cargado.

El seguimiento sin papel de las cantidades está ganando aceptación entre los Departamentos de Transporte y los contratistas. Esta práctica se conoce como boletería electrónica. La Administración Federal de Carreteras (FHWA) define la boletería electrónica como “un proceso sin papel para rastrear, documentar y archivar la información de los materiales, accesible en tiempo real mediante dispositivos móviles”.

Además, la FHWA ha promovido el uso de la boletería electrónica mediante la inclusión de tecnologías de construcción electrónica en las rondas 3, 4 y 6 de su programa Cada Día Cuenta. El Programa de Investigación Cooperativa en Carreteras (NCHRP) publicó en 2020 una síntesis del estado actual de esta práctica en la Síntesis 545, titulada Boletería Electrónica de Materiales para la Gestión de la Construcción. El brote de la COVID-19 ha sido reconocido como un impulso importante de la expansión del uso de la boletería electrónica. La eliminación del papel que es manipulado por varias personas se consideró una forma de evitar la propagación de la enfermedad.

La boletería electrónica agiliza la gestión de la información mediante la automatización de la recolección, el manejo y la verificación de los datos de producción de la mezcla. Esto permite la captura en tiempo real de los datos de construcción, los cuales pueden ser analizados según sea necesario durante o después de la finalización del proyecto. Los datos se registran y archivan automáticamente, simplificando el proceso. La información capturada en una boleta electrónica es la misma que aparece en las boletas tradicionales de papel.

7. Colocación de la Mezcla

Ver Video:
Operaciones de la pavimentadora

7.1 INTRODUCCION

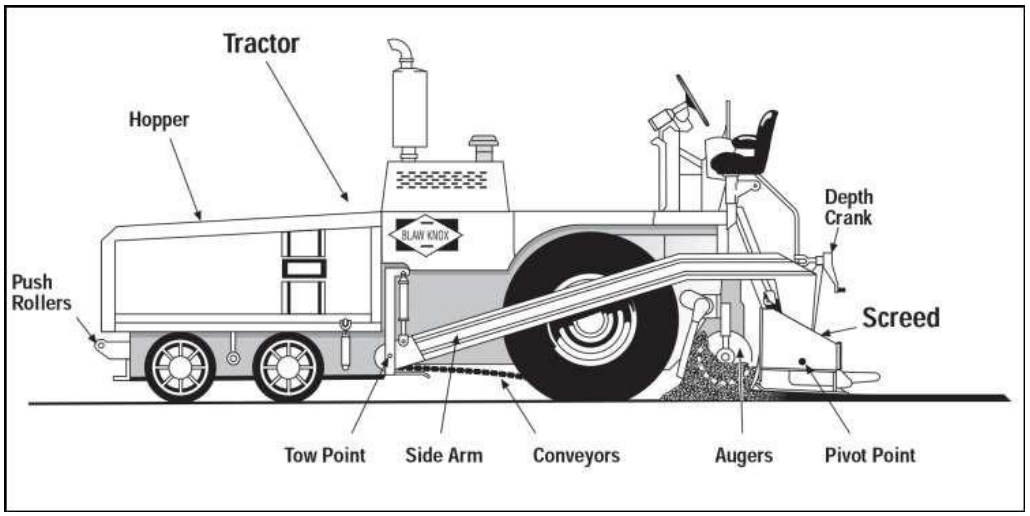
La operación de colocación de la mezcla (también conocida como extendido o pavimentación) es una parte crítica en la construcción de un pavimento asfáltico de calidad y duradero. Es importante comprender el funcionamiento adecuado del equipo de pavimentación y las mejores prácticas de pavimentación para obtener un pavimento duradero, uniforme y confortable para el tránsito, que cumpla con los estándares de construcción de calidad. Algunas agencias requieren que el contratista presente un plan que detalle las prácticas y procedimientos que se utilizarán durante el proceso de extendido. Esta es una oportunidad ideal tanto para el contratista como para la agencia de comprender todos los aspectos del proceso y garantizar que se cumplan las especificaciones de la agencia.

Una pavimentadora se utiliza para colocar la mezcla asfáltica con el ancho, pendiente, inclinación transversal y espesor deseados, logrando un manto uniforme que mejora la comodidad y la regularidad de la vía. Existen dos tipos de pavimentadoras: sobre orugas y sobre neumáticos, que cumplen funciones similares durante la operación de pavimentación.

La pavimentadora sobre orugas, cuyas orugas pueden ser totalmente de acero, de acero con placas de goma o de goma continua, ofrece un alto grado de flotación y tracción. La pavimentadora sobre neumáticos tiene una mayor velocidad de desplazamiento y es más maniobrable que la pavimentadora sobre orugas. Cuando se configuran y operan correctamente, ambos tipos pueden colocar un manto uniforme y liso que cumpla con las tolerancias requeridas del proyecto.

7.2 UNIDAD TRACTORA

Una pavimentadora tiene dos componentes principales: la unidad tractora y la unidad de regla. La unidad tractora proporciona toda la energía eléctrica, hidráulica y de propulsión necesaria para completar las operaciones de colocación en el sitio. La unidad tractora realiza las funciones necesarias para recibir la mezcla asfáltica de los camiones de acarreo o de los MTV, o para recoger la mezcla mediante un elevador de hilera, transportarla a través de la máquina hasta los sinfines y distribuir uniformemente la mezcla a lo ancho de la regla. La unidad tractora arrastra la unidad de regla autonivelante a través de la mezcla mientras se coloca. La regla proporciona la textura inicial y la compactación del manto a medida que este sale de debajo de la regla. La Figura 79 muestra los elementos clave de la unidad tractora y de regla.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 79. Esquema de una Pavimentadora de Asfalto

7.2.1 Rodillos de empuje

Los rodillos de empuje, ubicados en la parte frontal de la tolva de la pavimentadora, se utilizan para mantener el contacto con los neumáticos del camión de acarreo y empujarlo delante de la pavimentadora. Los rodillos deben estar limpios y girar libremente para permitir un avance suave de la pavimentadora. Si los rodillos de empuje no se limpian periódicamente o no giran libremente, los neumáticos del camión se deslizarán sobre los rodillos, aumentando la carga sobre la pavimentadora. Además, si un rodillo gira libremente y el otro no, la pavimentadora puede volverse más difícil de maniobrar.

Muchas pavimentadoras están equipadas con un enganche para camión, ubicado debajo de la máquina o incorporado a los rodillos de empuje en la parte frontal, como se muestra en la Figura 80. El propósito del enganche es mantener el camión en contacto con la pavimentadora, evitando que el camión se desconecte accidentalmente y vuelque mezcla sobre el pavimento frente a la pavimentadora. El enganche, controlado por el operador de la pavimentadora, cuenta con brazos extensibles hacia adelante con rodillos adheridos. Los rodillos se retraen contra el rin y el neumático del camión, evitando que este pierda contacto con la pavimentadora durante el proceso de descarga. Una vez que la mezcla del camión ha sido vaciada, el enganche se retira, y el camión puede alejarse de la pavimentadora.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 80. Enganche para Camión en la Parte Frontal de la Pavimentadora

7.2.2 Sistema de Manejo de Materiales

El sistema de alimentación de material en la unidad tractora desempeña un papel muy importante para producir un manto consistente y de alta calidad detrás de la pavimentadora. El sistema de alimentación de material generalmente está compuesto por la tolva de la pavimentadora, transportadores de listones, puertas de control del flujo de material y un par de sinfines.

7.2.2.1 Tolva de la Pavimentadora

La tolva de la pavimentadora, mostrada en la Figura 81, recibe la mezcla entregada y sirve como un área de almacenamiento temporal para el material proveniente del camión de acarreo, el elevador de hilera o el MTV. La capacidad de la tolva permite que la pavimentadora mantenga un avance constante entre las cargas de mezcla que se entregan. Los métodos de entrega de la mezcla se detallan en el Capítulo 6.

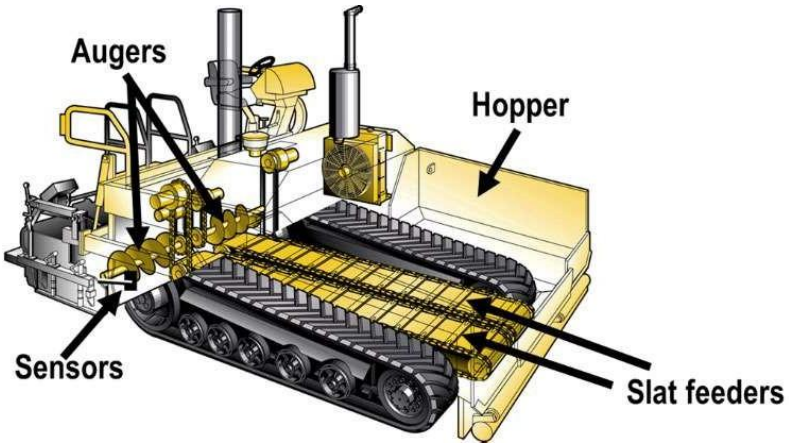
Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 81. Tolva de la Pavimentadora entre Cargas

7.2.2.2 Transportadores de Listones

En la parte inferior de la tolva de la pavimentadora suele haber un conjunto de transportadores de listones, compuesto por cadenas pesadas y barras de arrastre (ver Figura 82). Los transportadores de listones forman un sistema continuo, donde los listones se hacen girar de regreso hacia el fondo de la tolva, por debajo de la pavimentadora. Estos dispositivos se utilizan para transportar la mezcla asfáltica desde la tolva a través de los túneles de la pavimentadora y devolverla hacia los sinfines. El transportador de listones de un lado de la pavimentadora opera de manera independiente al del otro lado. El sistema de transporte funciona independientemente de la velocidad de la pavimentadora y, en la mayoría de los casos, también de la velocidad de los sinfines. Por lo tanto, la cantidad de mezcla transportada de regreso por un lado puede diferir de la que se entrega por el otro lado, y el operador de la pavimentadora puede ajustar la tasa de alimentación a cualquiera de los lados para pavimentar espaldones, rampas, salidas, etc.

¡En algunas pavimentadoras, el sistema de transportadores de listones ha sido reemplazado por un sistema de transportadores de tornillo. El propósito de este último sistema es volver a mezclar la mezcla en la tolva de la pavimentadora y reducir la segregación detrás de la regla.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 82. Sistema de Alimentación de Materiales

7.2.2.3 Compuertas de Control de Flujo

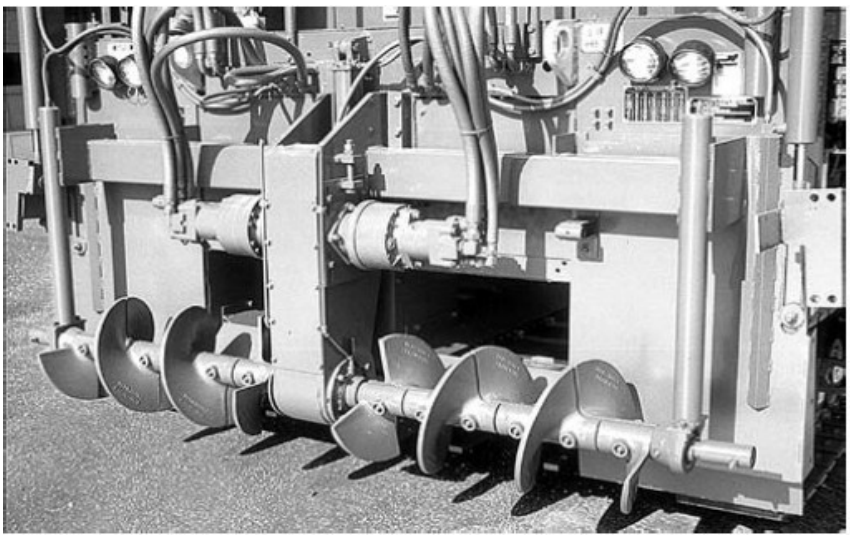
En la parte trasera de la tolva de la pavimentadora de muchas máquinas se encuentra un conjunto de compuertas de control de flujo. Estas compuertas, una sobre cada uno de los dos transportadores de listones, se utilizan para regular la cantidad de mezcla que puede ser entregada por cada transportador. Las compuertas deben ajustarse para proporcionar un nivel uniforme de material (a la altura del centro del eje del sinfín o ligeramente por encima) frente a la regla. No se requieren compuertas cuando el transportador y el sinfín correspondiente son accionados de manera independiente. Si se necesita más mezcla en un lado de la máquina que en el otro, el operador de la pavimentadora o el sistema automático de control de flujo incrementa la velocidad del transportador en ese lado, entregando así más material a los sinfines y manteniendo constante el nivel de mezcla frente a la regla.

7.2.2.4 Tornillos Sin Fin

La mezcla transportada hacia la parte trasera de la unidad tractora por los transportadores de listones es depositada frente a los tornillos sin fin (ver Figura 82). Al igual que los dos transportadores de listones, los tornillos sin fin de cada lado de la pavimentadora se operan de forma independiente uno del otro. El tornillo de un lado de la pavimentadora funciona en conjunto con el transportador de listones de ese mismo lado. Además, el operador de la pavimentadora tiene la opción de operar el sistema de transportador y tornillo izquierdo o derecho en modo manual o automático. En modo automático, un sensor de control de alimentación ubicado en ese lado de la máquina controla el nivel de material en el borde exterior del tornillo. Es extremadamente importante que los tornillos lleven una cantidad constante de mezcla a través del frente de la regla para que la cabeza de material frente a la regla permanezca lo más constante posible.

Es extremadamente importante que los tornillos sinfín transporten una cantidad uniforme de mezcla a lo largo de toda la parte frontal de la regla, de modo que la cabeza de material frente a la regla se mantenga lo más constante posible.

En la unión de los dos tornillos en el centro de la pavimentadora, adyacente a cada lado de la caja de transmisión (gearbox) del tornillo, típicamente hay un tornillo de forma diferente (tornillo inverso) o una paleta utilizada para introducir (empujar) la mezcla debajo de la caja de transmisión y asegurar que la colocación de la mezcla en esta ubicación sea la misma que en el resto del ancho de la mezcla que se está colocando. En la Figura 83 se muestra una pavimentadora equipada con un par de paletas inversas, con la regla removida.



Fuente: Asphalt Institute

Figura 83. Tornillo Sinfín de Pavimentadora con Paletas Centrales Inversas

Si no se coloca suficiente mezcla debajo del centro de la regla y se introduce bajo la caja de transmisión, puede verse una franja longitudinal detrás de la pavimentadora en el centro de la regla. Esta franja puede ser una forma de segregación cuando la gravedad permite que la mezcla de los dos transportadores fluya

por debajo de la caja de transmisión. La textura superficial de la carpeta en esa ubicación puede ser más abierta que la de la mezcla adyacente y generalmente es de color más oscuro. Sin embargo, esto no siempre es un problema de segregación. Más bien, la textura más rugosa y el color más oscuro pueden ser causados por una falta de mezcla colocada debajo de la caja de transmisión. Cuando se mide cuidadosamente, la elevación de la mezcla en la franja puede estar ligeramente por debajo de la de la mezcla circundante; la franja es en realidad un punto bajo en la superficie de la carpeta. Si una franja de caja de transmisión es visible en el centro de la regla principal de la pavimentadora, se debe verificar la instalación de un tornillo inverso o un sistema de paletas en la pavimentadora. Si los tornillos inversos o las paletas están presentes, se deben hacer ajustes para introducir más mezcla debajo de la caja de transmisión; los tornillos o paletas desgastados deben reemplazarse según sea necesario.

El área alrededor del tornillo sin fin a menudo se denomina cámara del tornillo (auger chamber). La cámara del tornillo, mostrada en la Figura 84, está delimitada por el frente de la regla, la base sobre la cual se está colocando la mezcla y la parte trasera de la unidad tractora. Las pavimentadoras modernas están equipadas con tornillos de altura variable que pueden cambiarse según sea necesario.

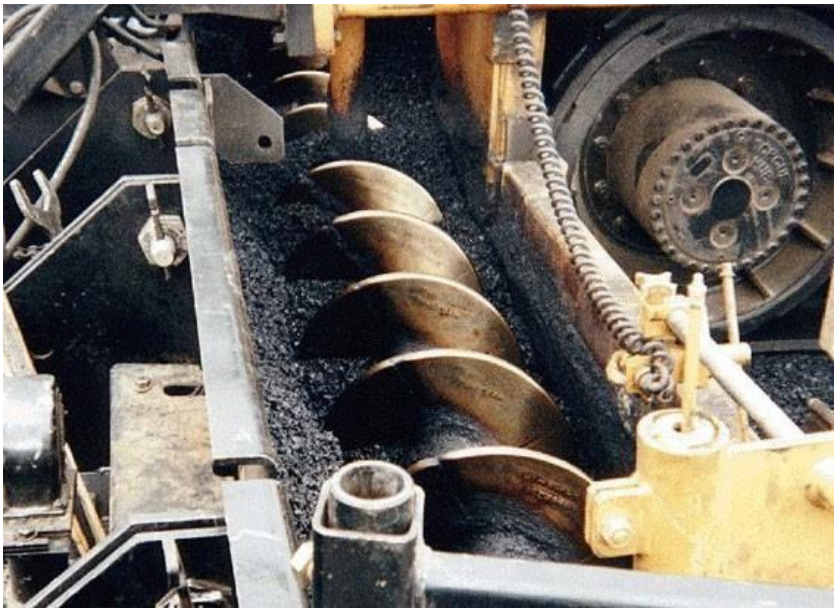
Fuente: University of Idaho Visual Productions

Figura 84. Cámara del Tornillo Sin fín

La distancia horizontal desde el tornillo sin fin hasta el frente de la regla y la parte trasera de la unidad tractora debe ser igual si es posible. Una buena regla práctica es mantener estas distancias a tres veces el tamaño máximo del agregado de la mezcla.

La altura del sinfín desde la capa base se ajusta normalmente de acuerdo con la profundidad de pavimentación. Una buena regla práctica es establecer la distancia desde la capa base hasta la parte inferior de los sinfines igual al espesor de la capa suelta más de 2 a 2.5 veces el tamaño máximo del agregado en la mezcla que se está colocando. Cuando la altura del sinfín es demasiado baja, las imperfecciones en la textura de la carpeta pueden

aparecer. La elevación de la parte inferior del sinfín nunca debe estar al mismo nivel o por debajo de la parte superior de la mezcla que se está colocando. Si se nota una segregación en la línea central, eleve los sinfines una pulgada más para dejar más espacio para que la mezcla llene el centro de la caja del sinfín. La cantidad de mezcla transportada en la cámara del sinfín debe ser lo más constante posible. La profundidad adecuada del material en los sinfines es en el centro del eje del sinfín. El nivel de material transportado delante de la regla no debe ser tan bajo como para exponer la parte inferior de las hélices del sinfín. Además, el nivel de mezcla que se entrega a la regla nunca debe ser tan alto como para cubrir la parte superior del sinfín. Este nivel constante de material delante de la regla debe continuar hasta más allá del extremo del sinfín. Cuando se pavimenta a una anchura superior a la de la regla básica, las extensiones del sinfín y las placas de confinamiento del material (extensiones del túnel) transportan uniformemente la mezcla a lo largo de toda la anchura de la regla. Lo ideal es que el sinfín y las extensiones del túnel se encuentren a una distancia de entre 12 y 18 pulgadas (0,3-0,5 m) de la placa final de la regla para minimizar la segregación y mantener una altura constante de material delante de la regla, como se muestra en la figura 85.



Fuente: Reway

Figura 85. Cabeza uniforme de material a la altura del eje

Si el sistema de alimentación está configurado y funciona correctamente, las cintas transportadoras de listones y los sinfines a cada lado de la pavimentadora rara vez se apagarán; funcionarán de manera lenta y continua (20-40 revoluciones por minuto). Esta acción continua de las cintas transportadoras y los sinfines se logra configurando la posición adecuada de las compuertas de flujo de la tolva (si las hay) y determinando la configuración de velocidad correcta para las cintas transportadoras y los sinfines. La clave para colocar una capa de pavimento lisa es utilizar el sistema de alimentación de material para mantener un nivel constante de material delante de la regla, principalmente manteniendo los transportadores de láminas y los sinfines funcionando el mayor tiempo posible. El funcionamiento intermitente de los sistemas de transportadores de láminas y sinfines puede provocar irregularidades en la capa, así como sombras de sinfines y ondulaciones en la capa detrás de la regla.

Los sensores de control de material controlan con precisión el volumen de material (cabezal de material) delante de la regla. Las combinaciones de sinfín/transportador a ambos lados de la pavimentadora funcionan de forma independiente entre sí, por lo que requieren sensores de control de material separados. Los sensores controlan el movimiento del material arrancando, deteniéndose o funcionando a velocidades variables para suministrar el volumen correcto de material que se ajuste a la demanda de material en función del ancho, la profundidad y la velocidad de pavimentación. Para funcionar correctamente, los sensores deben supervisar el material en movimiento (en constante desplazamiento) para proporcionar un flujo uniforme de material delante de la regla. Los fabricantes de equipos originales y los proveedores del mercado de repuestos utilizan diferentes tipos de sensores y los montan en diferentes posiciones para supervisar y controlar el f lujo de material. Dos tipos comunes de sensores de material son los sensores de contacto y los sensores ultrasónicos. Los sensores de contacto utilizan un dispositivo de conmutación, como un interruptor de encendido y apagado o un potenciómetro, que se activa cuando un brazo de paleta toca físicamente el flujo de material. A medida que el brazo de paleta, que se muestra en la Figura 86, se aproxima a una posición casi vertical, los accionamientos del sinfín comienzan a suministrar más mezcla hasta que el brazo alcanza un ángulo preestablecido y se apaga.

Fuente: Producciones visuales de la Universidad de Idaho
Figura 86. Interruptor de palanca

Los sensores ultrasónicos, que se muestran en la figura 87, son dispositivos sin contacto que utilizan ondas sonoras para supervisar continuamente la superficie del material que se transporta delante de la regla. A medida que la mezcla se

a medida que la mezcla se consume, la distancia medida por el sensor aumenta y los sistemas de sinfines se activan para reponer el volumen de mezcla frente a la regla. Para asegurar una lectura precisa, el haz sónico debe apuntar perpendicularmente (aproximadamente 90 grados) al flujo activo en la cara de la mezcla. El controlador varía entonces la velocidad de las bandas transportadoras y de los sinfines en cada lado de la máquina para mantener un nivel constante de mezcla frente a la regla.

Fuente: Caterpillar, Inc.

Figura 87. Sensor sin contacto

A medida que el nivel de mezcla frente a la regla sube y baja, la velocidad del sistema de alimentación aumenta o disminuye para mantener un nivel constante y un flujo uniforme a lo largo del ancho de la regla. Para que el sistema automático de control de alimentación funcione correctamente, los sensores de alimentación deben ubicarse lo más cerca posible de los extremos exteriores de los sinfines. Si se utilizan extensiones rígidas de la regla, el brazo de control debe montarse más allá de los extremos de los sinfines, justo dentro de la compuerta lateral de la regla del pavimentador. Si se utiliza una regla extensible hidráulicamente, la ubicación del brazo de control del sensor de alimentación debe minimizar la cantidad de mezcla acumulada frente a las extensiones; en la mayoría de los casos, esto significa que el sensor debe montarse en la compuerta lateral de la regla, con la paleta o varilla del sensor colgando a poca distancia frente al extremo de la regla extensible.

7.2.3 Manejo de la tolva

La cantidad de mezcla en la tolva del pavimentador debe mantenerse siempre por encima de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel en la parte posterior de la tolva. Esto permite que el operador mantenga llenas las bandas transportadoras del pavimentador y, con ello, un flujo constante de material frente a la regla. Esta práctica es especialmente importante entre cargas sucesivas de mezcla para reducir los problemas de segregación.
Como se muestra en la Figura 88, los costados, o alas, de la tolva son móviles. Se considera una buena práctica no plegar (vaciar) las alas. Sin embargo, algunos operadores las pliegan entre cada

carga de mezcla. Para evitar el derrame de material por la parte frontal de la tolva cuando las alas se pliegan, el operador suele bajar el nivel de mezcla en la tolva manteniendo en funcionamiento las bandas de listones, lo que provoca que estas queden vacías. Esto puede permitir que la mezcla se segregue al deslizarse hacia la banda transportadora, como se ilustra en la Figura 89. El material ubicado en los bordes exteriores de las alas puede segregarse cuando es descargado desde el camión. Además, la mezcla almacenada en las zonas estancadas de la tolva comenzará a enfriarse, lo cual puede ser significativo, especialmente en clima frío. Esta situación constituye una fórmula perfecta para la segregación entre cargas, descrita en el Capítulo 10.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 88. Plegado de las alas de la tolva

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 89. Tolva del pavimentador mal gestionada

Para evitar que la mezcla asfáltica se acumule en las esquinas de la tolva, se puede colocar un raspador en cada esquina de la tolva. Una pieza triangular de chapa de acero atornillada a los lados de la tolva evitará que la mezcla se transporte en las esquinas de la tolva. También es posible simplemente no vaciar las alas de la pavimentadora durante el día de pavimentación. La mezcla se enfriará y formará un ángulo de reposo natural. Al final del día, el material frío se retira de cada área de ala y se transporta de regreso a la planta de asfalto para su reciclaje.

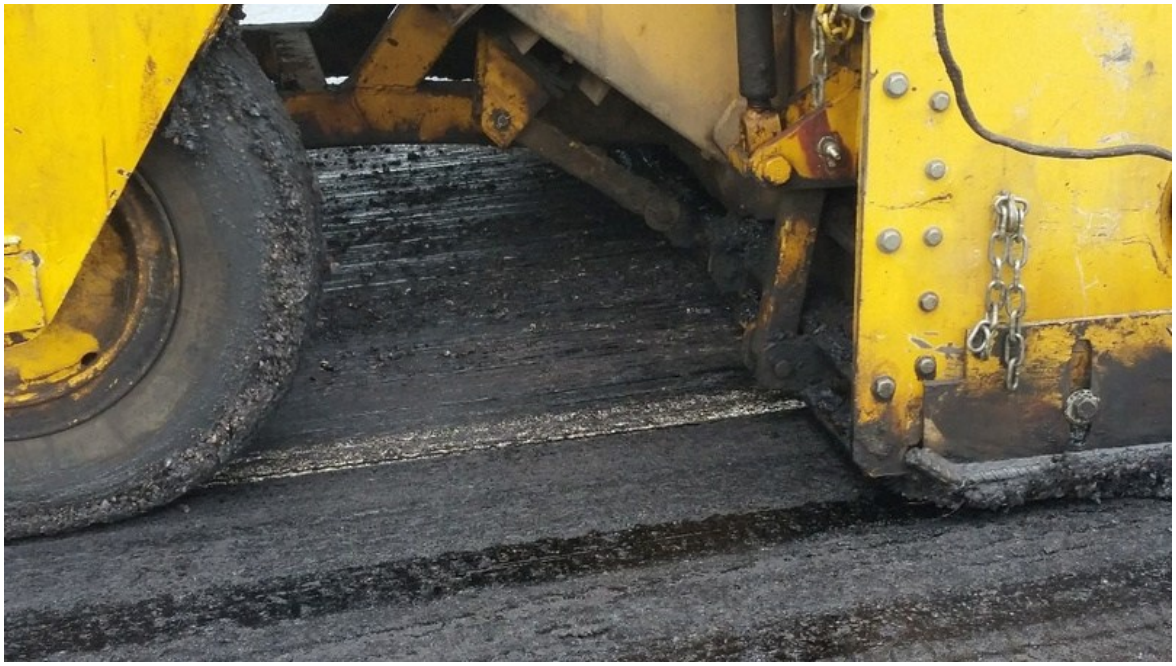
La mejor práctica es evitar que la mezcla asfáltica se acumule o enfríe en las alas mediante el uso de un inserto de tolva como se describe en el Capítulo 6 y el uso de un MTV o elevador de hilera para alimentar la pavimentadora. Los lados empinados de un inserto de tolva proporcionan una acción viva constante enfocada directamente sobre los transportadores de listones y eliminan la segregación causada por la tolva de la pavimentadora. Esto también desconecta los vehículos de transporte de la pavimentadora, reduciendo el tiempo de descarga y el contacto inadvertido con la pavimentadora. Mantener la tolva llena entre cargas de mezcla ayuda a mantener una altura constante de mezcla asfáltica frente a la regla enrasadora de la pavimentadora y reduce la pérdida de calor de la mezcla y del equipo. Además, un inserto de tolva de pavimentadora añade almacenamiento de material, lo que ayuda a mantener la pavimentación continua.

Cuando sea necesario plegar las alas, las alas deben vaciarse antes de que la mezcla que se acumula en las esquinas de la tolva se haya enfriado. Los lados de la tolva deben elevarse lentamente tan pronto como el camión de acarreo se haya vaciado y se haya alejado de la pavimentadora. Se debe mantener una velocidad constante de pavimentación hacia adelante de la máquina de colocación mientras los lados de la tolva continúan elevándose. Las alas deben estar completamente elevadas antes de que la cantidad de mezcla restante en la tolva sea inferior a la parte superior de las compuertas de flujo o las aberturas en la parte posterior de la tolva. Los transportadores de listones nunca deben ser visibles en el momento en que se eleven las alas, ni en ningún otro momento durante la operación de pavimentación. La pavimentadora debe detenerse antes de que las aberturas del túnel o las compuertas de flujo sean visibles, y luego se deben bajar los lados de la tolva.

Cuando se utiliza un elevador de hilera (mostrado en la Figura 90 y la Figura 91), las cuchillas del transportador de listones deben ajustarse al nivel correcto para recoger la mayor cantidad posible de la mezcla que se ha colocado sobre el pavimento existente. Esencialmente, no debe quedar mezcla en la hilera, excepto una cantidad mínima en los puntos bajos de la superficie del pavimento cuando se está colocando una capa de nivelación. Cualquier capa delgada de material que permanezca se enfriará rápidamente y puede resultar en dificultades para compactar la mezcla. Además, pueden ocurrir estrías longitudinales en la capa detrás de la pavimentadora en la misma ubicación que los bordes exteriores de la hilera.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 90. Elevador de hilera



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 91. Elevador de hilera Recogiendo la hilera Completa

7.3 UNIDAD DE REGLA ENRASADORA

Ver video
Cálculos de Rendimiento

La unidad de regla enrasadora, que es remolcada por la unidad tractora, establece el espesor de la capa asfáltica y proporciona la textura inicial a la nueva superficie. Además, a través de su peso y acción vibratoria, la regla enrasadora imparte la densidad inicial al material que se está colocando.

Fuente: NAPA

Figura 93. Entendedora de enrasado extensible

Las extensiones hidráulicas de la regla se montan de dos maneras: delante o detrás de la regla principal. Las extensiones montadas en la parte delantera se mueven hacia dentro y hacia fuera delante de la regla principal. Las reglas montadas en la parte delantera se pueden retraer más fácilmente que las extensiones montadas en la parte trasera. Esto se debe a que las reglas montadas en la parte delantera pueden desplazar la cabeza de la mezcla hacia la cámara del sinfín principal al retraerse. Las reglas montadas en la parte trasera deben hacer frente a la compresión de la mezcla de pavimentación contra el extremo de la regla principal a medida que se retraen. Por lo tanto, las reglas montadas en la parte delantera se ven con más frecuencia en proyectos de tipo urbano, y las reglas montadas en la parte trasera son las preferidas por los equipos que pavimentan autopistas principales y proyectos de aeródromos que requieren cambios de anchura menos frecuentes.

7.3.1 Puntos de remolque

La unidad de regla se acopla al tractor en un solo punto a cada lado de la pavimentadora. Este punto, que se muestra en la Figura 94, se denomina punto de remolque (o tracción). Los puntos de remolque son conexiones de tipo pasador que permiten que los brazos niveladores (también llamados brazos laterales, brazos de tracción o brazos de remolque) de la regla giren o pivoten libremente alrededor de esos puntos. Los puntos de remolque están montados en el extremo de un cilindro hidráulico que está fijado al bastidor del tractor. La altura de los puntos de remolque se puede ajustar manualmente o controlar automáticamente mediante la pavimentadora. Las reglas automáticas se tratan en profundidad en la sección 7.4.

7.3.2 Línea de tracción

La línea de tracción se refiere al ángulo en el que se tira de la regla hacia adelante. Por lo general, se coloca una superficie de pavimento más lisa cuando la fuerza de tracción se aplica en paralelo a la superficie final que se está colocando. Por lo tanto, la elevación de los puntos de tracción debe ajustarse en relación con el espesor de la capa que se está construyendo. Por lo general, las capas finas de HMA requieren un ajuste inicial más bajo del punto de tracción, mientras que las capas gruesas de mezcla requieren un ajuste inicial más alto.

Fuente: Producciones visuales de la Universidad de Idaho

Figura 93. Punto de remolque y línea de tracción

En el caso de una capa relativamente fina, si el ajuste del punto de remolque es extremadamente alto, las fuerzas de remolque se aplican en un ángulo ascendente que aumenta las fuerzas de elevación que actúan sobre la regla. Para mantener un espesor determinado del material, es necesario reducir el ángulo de ataque de la regla para compensar el aumento de la elevación. En estas condiciones, la regla funciona con un ángulo de ataque ligeramente inclinado hacia abajo. Solo la parte delantera de la regla compacta y acaba el HMA que se está colocando; el resultado es una textura deficiente de la capa y un desgaste extremo de la parte delantera de la placa de la regla. Además, cuando la pavimentadora se detiene, la regla puede tener tendencia a balancearse o tambalearse a medida que el tractor relaja la tensión sobre la regla. Esto puede aumentar el asentamiento de la regla e introducir baches en la capa.

En el caso de una capa relativamente gruesa, si el ajuste del punto de remolque es extremadamente bajo, las fuerzas de remolque se aplican en un ángulo descendente que disminuye las fuerzas de elevación aplicadas a la regla. Para mantener un espesor determinado de HMA, es necesario aumentar el ángulo de ataque de la regla para compensar la disminución de la elevación. En esta condición, la regla funciona con la parte trasera soportando la mayor parte de la presión de compactación y acabado. Esto provoca una textura deficiente de la capa y un desgaste extremo de la parte trasera de la parte inferior de la placa de la regla. Se obtiene un mayor control de las fuerzas aplicadas a la regla ajustando los puntos de remolque en relación con el espesor de la capa que se está colocando.

El principio de la regla flotante permite el funcionamiento con control manual. Cuando se utiliza con control manual, es importante que los puntos de remolque a ambos lados del tractor estén al mismo nivel por encima de la capa base. La posición de los puntos de

Fuente: Producciones Visuales de la Universidad de Idaho

Figura 94. Punto de tiro y Línea de tracción

Para una carpeta relativamente delgada, si el ajuste del punto de ataque está extremadamente alto, las fuerzas de arrastre se aplican en un ángulo ascendente que incrementa las fuerzas de levantamiento (lift forces) que actúan sobre la regla. Para mantener un espesor determinado del material, el ángulo de ataque de la regla debe reducirse para compensar el aumento de la fuerza de levantamiento. En esta condición, la regla funciona con un ángulo de ataque ligeramente inclinado hacia abajo (punta hacia abajo). Solo la parte frontal de la regla compacta y termina la mezcla asfáltica (HMA) que se está colocando; el resultado es una textura deficiente en la carpeta y un desgaste extremo en la parte frontal de la placa de la regla. Además, cuando la pavimentadora se detiene, la regla puede tender a oscilar o bascular cuando el tractor libera la tensión sobre ella. Esto puede aumentar el asentamiento de la regla e introducir baches o irregularidades en la superficie.

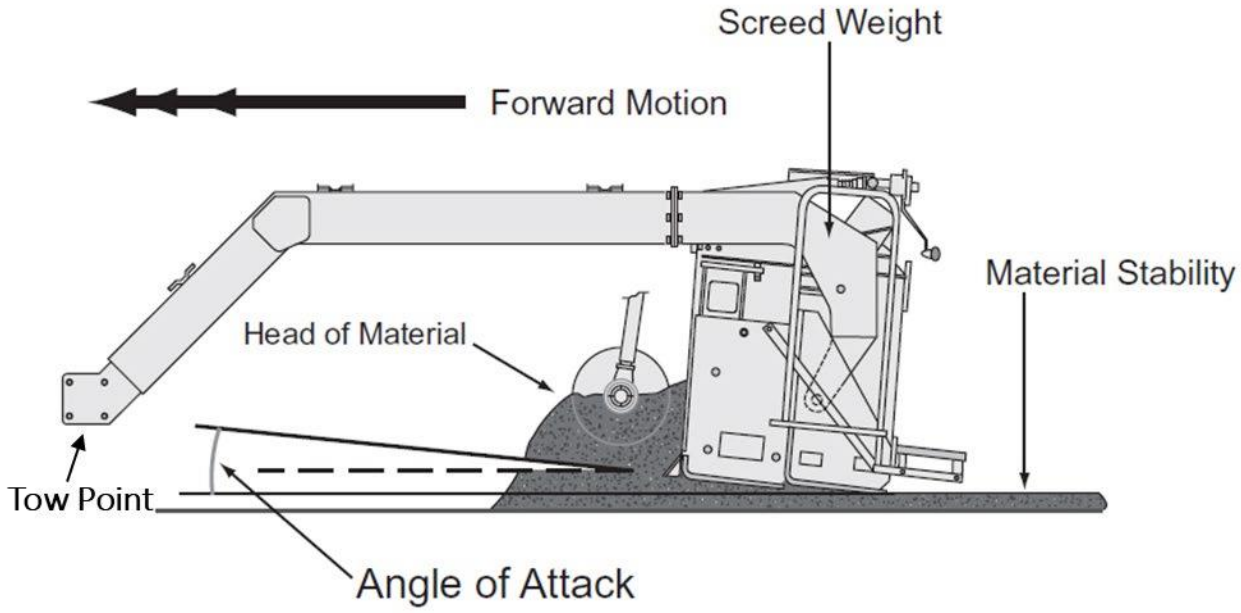
Para una carpeta relativamente gruesa, si el ajuste del tow point está extremadamente bajo, las fuerzas de arrastre se aplican en un ángulo descendente que disminuye las fuerzas de levantamiento aplicadas a la regla. Para mantener un espesor determinado de HMA, el ángulo de ataque de la regla debe incrementarse para compensar la disminución de dicha fuerza. En esta condición, la regla opera de manera que la parte posterior soporta la mayor parte de la presión de compactación y acabado. Esto genera una textura deficiente en la carpeta y un desgaste extremo en la parte posterior de la placa de la regla. Un mayor control de las fuerzas aplicadas a la regla se obtiene ajustando el punto de ataque en función del espesor de la carpeta que se está colocando.

El principio de la "regla flotante" permite operar bajo control manual. Cuando se utiliza en modo manual, es importante que los puntos de ataque en ambos lados del tractor estén al mismo nivel con respecto a la capa base. La posición de los puntos de ataque puede modificarse subiendo o bajando sus soportes. Para la mayoría de las mezclas asfálticas, los puntos de ataque se colocan

cerca del punto medio del rango de movimiento. Para algunas mezclas asfálticas, como aquellas muy rígidas o muy sensibles (tender mixes), puede ser ventajoso subir o bajar la altura del punto de ataque para mejorar la textura de la carpeta colocada.

7.3.3 Fuerzas Que Actúan Sobre La Regla

La capacidad de una regla flotante libre para funcionar se debe al delicado equilibrio de fuerzas que actúan sobre ella (ver Figura 95). Las fuerzas sobre la regla deben estar en equilibrio (la suma de todas las fuerzas igual a cero) para que la regla flotante permanezca suspendida dentro de la mezcla mientras es arrastrada por la unidad tractora. Las fuerzas ejercidas en la parte frontal de la regla y por debajo de ella son contrarrestadas por el peso de la regla y por el ángulo de ataque. Cuando ocurre un cambio en cualquiera de estas fuerzas, la regla se elevará o descenderá hasta alcanzar un nuevo equilibrio, y el espesor de la carpeta que se está colocando cambiará en consecuencia.



Fuente: Instituto Del Asfalto

Figura 95. Elementos que influyen en las fuerzas de la regla

Muchas fuerzas afectan la regla. Es importante comprender aquellas fuerzas que son más fáciles de controlar en el campo: el ángulo de ataque, la velocidad de la pavimentadora, la altura de material y las propiedades de la mezcla (especialmente la temperatura).

Las fuerzas que actúan sobre la regla deben estar en equilibrio (la suma de todas las fuerzas igual a cero) para que la regla flotante permanezca suspendida dentro de la mezcla mientras es arrastrada por la unidad tractora.

7.3.3.1 Ángulo De Ataque

El extremo delantero de los brazos de tiro de la regla se conecta a puntos de pivote en el tow point de la pavimentadora. El pivote del tow point siempre es libre de rotar mientras la regla es arrastrada a través de la mezcla. Existe otro punto de pivote en la parte trasera de los brazos de tiro, donde éstos se conectan a la regla. Este pivote de la regla queda bloqueado en su posición mediante el dispositivo de control de espesor (tornillo) ubicado en la regla. La posición de este tornillo de bloqueo es la que establece el ángulo de ataque.

La inclinación del ángulo de ataque contribuye significativamente a la fuerza ascendente que actúa sobre la regla y permite que la regla flotante funcione correctamente. Si ninguna otra fuerza que actúa sobre la regla cambia, un aumento en el ángulo de ataque incrementará la componente vertical ascendente de la fuerza que actúa sobre la regla. Disminuir la inclinación reduce la fuerza ascendente sobre la regla. La elevación de la regla responderá a estos cambios de fuerza hasta que las fuerzas que actúan sobre ella vuelvan a un estado de equilibrio.

La elevación del tow point y el ángulo de ataque deben ajustarse de modo que exista una presión uniforme en la parte inferior de la placa de la regla (de adelante hacia atrás) mientras se pavimenta al espesor deseado. Si el ángulo de ataque es demasiado bajo, habrá una presión y desgaste excesivo en la punta de la regla; si es demasiado alto, esa presión y desgaste recaerán en la parte trasera de la regla. Ambas condiciones pueden generar problemas de textura no uniforme y aspereza en la superficie terminada de la carpeta.

7.3.3.2 Velocidad De La Pavimentadora

La fuerza ascendente ejercida sobre la regla cambia a medida que la velocidad de la pavimentadora aumenta o disminuye. A medida que la velocidad de la pavimentadora aumenta, la fuerza ascendente generada por el material que pasa por debajo de la regla se reduce. Cuando esta fuerza se reduce, el peso de la regla hace que esta descienda.

Si el tow point permanece sin cambios, la regla en descenso gira alrededor del pivote del tow point e incrementa el ángulo de ataque hasta alcanzar un nuevo equilibrio en una nueva elevación (carpeta más delgada). Por el contrario, cuando la velocidad de la pavimentadora disminuye, la fricción aumenta, generando más fuerza contra la regla. La regla se eleva hasta que el ángulo de ataque decreciente y el peso de la regla alcancen el equilibrio con el aumento de fuerza ejercido por la mezcla. Dado que la velocidad de la pavimentadora tiene un efecto significativo sobre el ángulo de ataque de la regla, es una buena práctica de pavimentación mantener la velocidad lo más constante posible durante las operaciones de extendido.

Idealmente, la velocidad de la pavimentadora debe ajustarse a la tasa de producción de la planta de asfalto. Suponiendo que la jornada de pavimentación tiene la misma duración que la jornada de producción de la planta, la velocidad ideal es aquella en la que la pavimentadora consume la mezcla al mismo ritmo que la planta la produce.

Como ejemplo, si una planta de asfalto está produciendo 300 toneladas por hora durante 10 horas, producirá 3,000 toneladas por día. Si el pavimento que se está colocando requiere 1,000 toneladas por milla, la planta producirá un tramo de 3 millas (15,840 pies).

Si ese tramo debe pavimentarse en 10 horas (600 minutos), la velocidad teórica de pavimentación sería: 15,840 pies divididos entre 600 minutos, lo que equivale a 26.4 pies por minuto.

Si el pavimento que se está colocando requiere 1,500 toneladas por milla, la longitud pavimentada sería de 2 millas en una jornada de 10 horas. En este caso, la velocidad de pavimentación es: 10,560 pies divididos entre 600 minutos, lo que equivale a 17.6 pies por minuto. Cada proyecto será diferente, pero el objetivo siempre debe ser realizar una pavimentación continua y sin interrupciones.

Cuando sea necesario detener la pavimentadora, esta debe detenerse tan rápido y suavemente como sea posible, antes de que el nivel de mezcla en la tolva descienda por debajo de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel.

La Sección 7.5 presenta un análisis detallado sobre el cálculo del rendimiento (yield).

Como se mencionó previamente, para lograr la mayor suavidad posible en la carpeta detrás de la regla de la pavimentadora, es esencial mantener la máquina en movimiento constante a una velocidad uniforme. Operar la pavimentadora más rápido de lo necesario para colocar toda la mezcla disponible y luego detenerse a esperar la llegada del siguiente camión disminuye la calidad de la carpeta terminada.

Cuando sea necesario detener la pavimentadora, debe hacerse tan rápido y suavemente como sea posible, antes de que el nivel de mezcla en la tolva descienda por debajo de la parte superior de las compuertas de flujo Puno de las aberturas del túnel. Esto permite mantener constante la altura de material frente a la regla, mientras que el efecto del cambio de velocidad sobre el ángulo de ataque se minimiza gracias al cambio rápido y controlado. El operador debe devolver la pavimentadora a la velocidad de extendido deseada lo más pronto posible, para limitar el impacto que el cambio de velocidad tiene sobre el ángulo de ataque. Se ha comprobado que el procedimiento de "parada rápida y arranque rápido" contribuye a obtener una carpeta con buena suavidad y espesor uniforme.

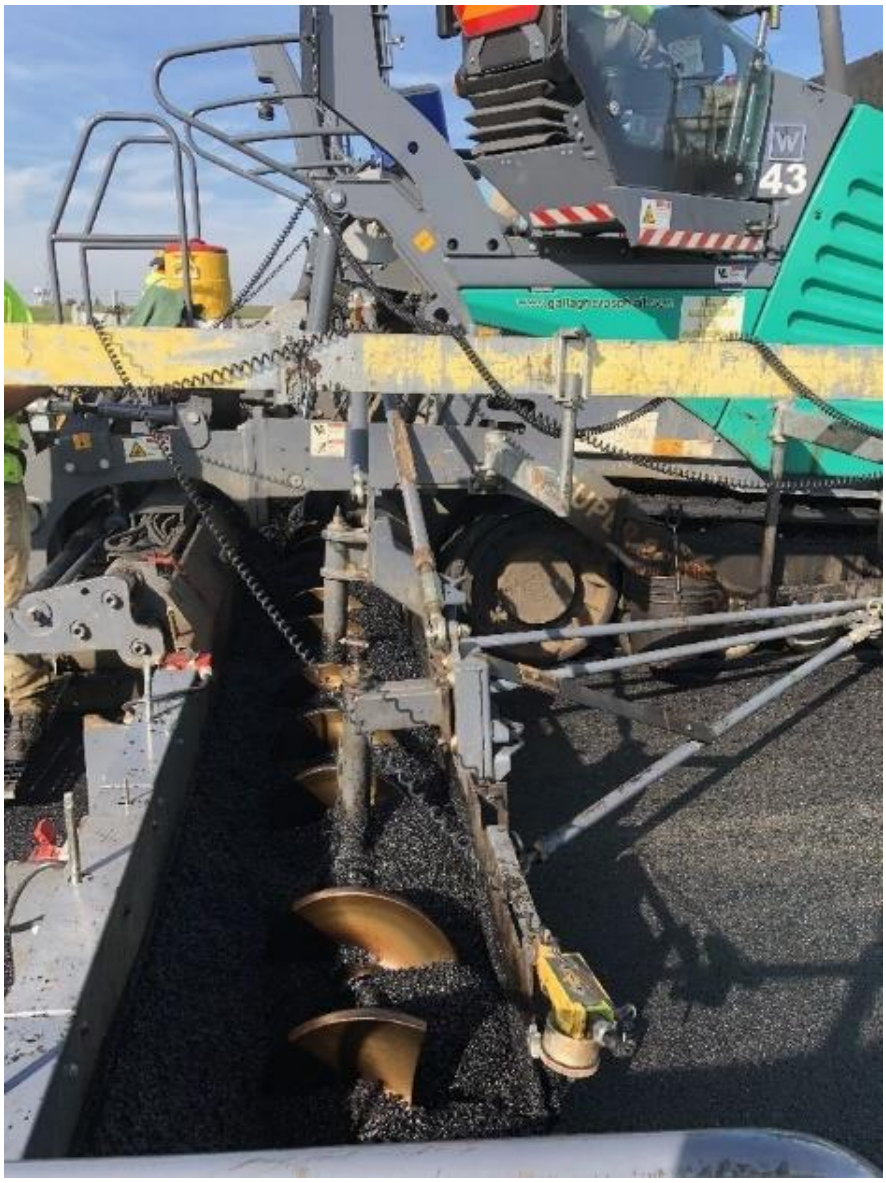
Es una buena práctica de pavimentación mantener la pavimentadora en una sola posición, con la tolva lo más llena posible y con una altura de material estable, hasta que llegue más mezcla. Si se anticipa una demora prolongada, debe considerarse la construcción de una junta transversal.

7.3.3.3 Altura de Material

La altura de material es la cantidad de mezcla asfáltica ubicada en la cámara de los sinfines que ejerce fuerza contra la regla. Cuando la altura de material cambia, también cambia la fuerza neta que actúa sobre la regla. A medida que varían las fuerzas que actúan sobre ella, la regla debe adoptar un nuevo ángulo de ataque para compensar el cambio en la fuerza aplicada.

La altura de material en la cámara de los sinfines está directamente influenciada por la operación de los transportadores de listones y los sinfines localizados a cada lado de la pavimentadora. Cuando los transportadores y los sinfines están en funcionamiento, la mezcla es extraída de la tolva de la pavimentadora, pasa a través del túnel y es distribuida por los sinfines frente a la regla.

Si el flujo de material y la velocidad de la pavimentadora se mantienen relativamente constantes, la altura de material que empuja contra la regla también permanece relativamente constante, y la carpeta colocada presenta una textura suave y uniforme (ver Figura 96).



Fuente: Asphalt Institute

Figura 96. Pavimentación en ancho con una altura de material uniforme

Si se permite que la altura de material varíe, la regla se moverá hacia arriba y hacia abajo en reacción a las fuerzas que actúan sobre ella. Cuando la cantidad de mezcla transportada por los sinfines disminuye porque los sistemas de transportadores de listones y sinfines están bajos de material o se apagan la regla desciende, lo que reduce el espesor de la carpeta detrás de la regla. A medida que los transportadores de listones y los sinfines vuelven a operar, más mezcla es transportada nuevamente hacia los sinfines y distribuida frente a la regla. Esto incrementa la fuerza ejercida sobre la regla y provoca que esta se eleve a una nueva posición, produciendo una carpeta más gruesa. Por lo tanto, es muy importante regular la cantidad de mezcla frente a la regla, ya que una altura de material constante está asociada con una textura uniforme y una superficie suave detrás de la pavimentadora.

7.3.3.4 Rigidez De La Mezcla

Otro factor que afecta el equilibrio de fuerzas sobre la regla es la temperatura o consistencia de la mezcla. Si una carga de mezcla fría es depositada en la tolva de la pavimentadora, la mezcla

más rígida aumenta la fuerza que actúa sobre la regla y hace que esta se eleve, incrementando el espesor de la capa colocada.

Por el contrario, si se entrega a la pavimentadora una carga de mezcla caliente, la disminución de la viscosidad del ligante reduce la rigidez de la mezcla y disminuye la fuerza ejercida sobre la regla. Esta situación provoca que la regla descienda y reduzca el espesor de la capa.

El tipo de mezcla también puede influir en la magnitud de la fuerza ejercida por la altura de material contra la regla. Por ejemplo, una mezcla gruesa con un ligante asfáltico altamente modificado es más rígida que una mezcla arenosa con un ligante no modificado.

7.3.4 Controles De Espesor

Ver video:
Controles de regla

Como se mencionó anteriormente, la regla está unida a los brazos de nivelación o brazos de tiro en cada lado de la pavimentadora a través de puntos de pivote. El mecanismo de control de espesor generalmente una manivela o palanca permite mover o rotar la regla alrededor de un punto de pivote. La clave del funcionamiento de nivelación de la regla es su unión a la unidad tractora mediante *punto de ataque* que pueden pivotar.

La clave del funcionamiento de nivelación de la regla es su unión a la unidad tractora mediante *punto de ataque* que pueden pivotar. Esto permite que la regla reaccione a la fuerza que actúa sobre ella y se mantenga en una posición de equilibrio.

A medida que la mezcla pasa por debajo de la placa de la regla, esta flota a través de la mezcla, estableciendo el espesor de la carpeta y la textura de la superficie, mientras proporciona la compactación inicial de la capa.

La clave del funcionamiento de nivelación de la regla es su unión a la unidad tractora mediante punto de ataque *que pueden pivotar. Esto permite que la regla reaccione a las fuerzas que actúan sobre ella y se mantenga en una posición de equilibrio*

7.3.4.1 Changing the Thickness Control Screws

Para una posición constante de los *punto de ataque* (es decir, la unidad tractora operando sobre una superficie nivelada y sin controles automáticos de regla), modificar el ajuste de los tornillos de control de espesor cambia el ángulo de ataque de la regla y las fuerzas que actúan sobre ella. Esto, a su vez, hace que la regla se desplace hacia arriba o hacia abajo hasta una nueva elevación conforme la pavimentadora avanza, alterando así el espesor de la carpeta que se está colocando.

La reacción de la regla a los cambios en el ángulo de ataque no es instantánea. Existe un retardo en la reacción que permite que la regla promedie las variaciones en las fuerzas que actúan sobre ella.

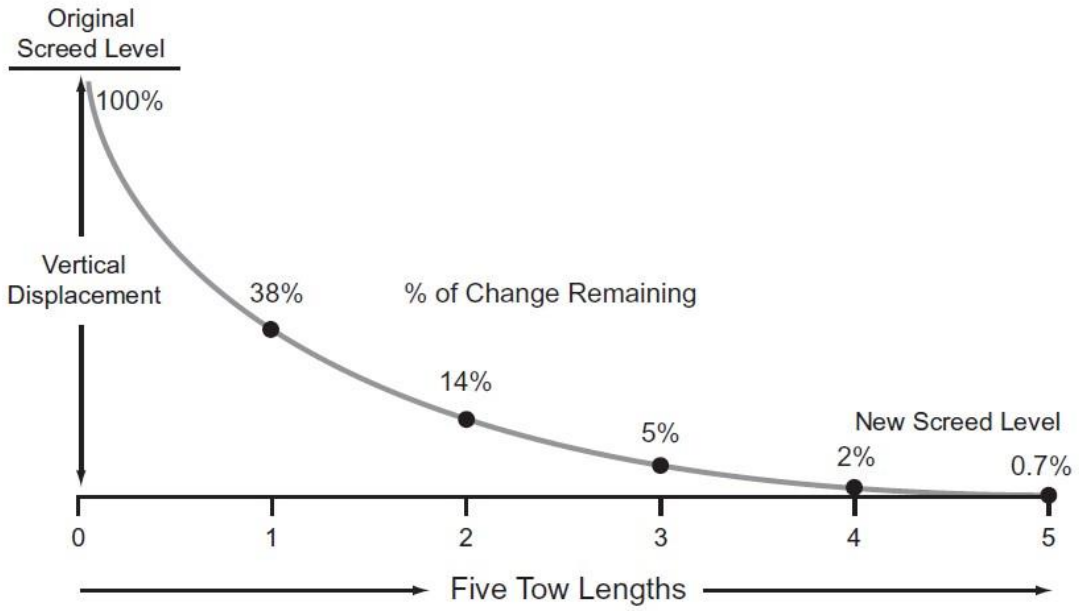
La Figura 97 muestra el tiempo de reacción de la regla cuando se realiza un cambio en el ángulo de ataque, ya sea en la propia regla o en el punto de ataque. Se requiere aproximadamente cinco veces la longitud de los brazos de tiro para que la regla complete el 99 % del cambio, ya sea hacia arriba o hacia abajo, y alcance la nueva elevación deseada.

Esto significa que, si la longitud de los brazos de tiro es de 10 pies (3 m), la pavimentadora debe avanzar al menos 50 pies (15 m) antes de que un ajuste en los tornillos de control de espesor se ejecute completamente en la regla.

Lo mismo aplica si el ángulo de ataque de la regla se modifica mediante los controles

automáticos de regla que cambian la altura de los puntos de ataque.

Reacción De La Regla A Lo Largo De Cinco Longitudes De Remolque



Fuente: Asphalt Institute

Figura 97. Distancia requerida para que la regla alcance el equilibrio

Es esencial que el operador de la regla sea consciente de este retardo en el tiempo de reacción de la regla. Si se realiza un segundo ajuste en la manivela de control de espesor antes de que el primer ajuste haya surtido efecto, el primer cambio nunca se completará, y aún serán necesarios otras cinco veces la longitud del brazo de nivelación para que el segundo ajuste de espesor se lleve a cabo.

Por esta razón, los cambios continuos en la configuración de los dispositivos de control de espesor suelen ser altamente perjudiciales para la suavidad del pavimento.

Debido al tiempo de reacción retardado de la regla, no debe usarse una sola medición de espesor de la carpeta para justificar un cambio en el ángulo de ataque de la regla. De hecho, ni siquiera dos o tres mediciones deberían promediarse para decidir si es necesario un ajuste en las manivelas de control de espesor.

Si se va a verificar el espesor no compactado de la carpeta usando un medidor de espesor, debe medirse la carpeta detrás de la regla al menos cinco veces, espaciadas a intervalos longitudinales de 6 pies (2 m).

Una mejor manera de comprobar periódicamente el rendimiento (yield) es determinar la distancia que deberían cubrir 10 camiones de mezcla, según el ancho y el espesor no compactado que se esté colocando. Luego, esta distancia se compara con la longitud de pavimento que la pavimentadora realmente ha colocado usando esa misma cantidad de mezcla.

Si la distancia cubierta es significativamente diferente a lo esperado, se debe ajustar la configuración de las manivelas de control de espesor para modificar ligeramente el ángulo de ataque de la regla y alcanzar el resultado deseado.

Es probable que los cambios continuos en el ajuste de los dispositivos de control de espesor resulten muy perjudiciales para la suavidad del pavimento.

7.3.4.2 Cambiar La Elevación Del Punto De Remolque

La explicación anterior también aplica cuando hay un cambio en la altura del punto de ataque en la unidad tractora. Si la altura del punto de ataque se modifica, ese cambio en su elevación se traduce en un cambio en el ángulo de ataque de la regla de la pavimentadora. La pavimentadora debe avanzar aproximadamente cinco veces la longitud del brazo de nivelación para que la regla reaccione al cambio en la ubicación del punto de ataque y se desplace hacia arriba o hacia abajo hasta alcanzar la nueva elevación. Cuando se pavimenta una carretera sin controles automáticos de nivelación y pendiente, la unidad tractora se mueve hacia arriba y hacia abajo en respuesta a la pendiente de la superficie subyacente. Este movimiento vertical del tractor se traduce en un movimiento vertical del punto de ataque en los laterales de la pavimentadora. Cada vez que el tractor pasa sobre un bache o entra en una depresión de la superficie existente, cambia la elevación del punto de ataque. Esto, a su vez, altera el ángulo de ataque de la regla, lo que hace que la cantidad de material que fluye bajo la regla disminuya o aumente. El hecho de que la regla requiera recorrer cinco veces la longitud del brazo de nivelación antes de reaccionar completamente a un cambio en la ubicación de los punto de ataque permite que la regla reduzca el espesor de la mezcla asfáltica que se coloca sobre las zonas altas de la superficie existente y aumente el espesor en los puntos bajos de la vía. Este efecto de promedio o nivelación es la base del principio de la regla flotante descrito anteriormente.

El uso de controles automáticos de la pavimentadora, discutidos en la siguiente sección, permite construir un pavimento más suave al mantener constante la ubicación de los *punto de ataque* con respecto a una referencia predeterminada, mientras la unidad tractora se mueve verticalmente en respuesta a pequeñas variaciones en la pendiente de la superficie subyacente.Al mantener los *punto de ataque* en una relación constante con la referencia predeterminada, incluso cuando el tractor se desplaza verticalmente, la fuerza que actúa sobre la regla permanece constante y el ángulo de ataque se mantiene uniforme con respecto a dicha referencia. Esto permite que la regla realice la acción de nivelación necesaria sobre una longitud mayor, reduciendo así la irregularidad de la superficie existente mediante la aplicación de la nueva capa de asfalto.

7.3.5 Placas de control frontal de la regla

En algunas pavimentadoras, la regla está equipada con una placa en su borde frontal también llamada strike-off. El propósito de este dispositivo es controlar la cantidad de mezcla que se permite pasar bajo la punta de la regla, lo que a su vez afecta el ángulo de ataque de la regla. El strike-off también se utiliza para reducir el desgaste del borde delantero de la regla.

Cuando existe un strike-off, su posición es importante. Si el strike-off se ajusta demasiado alto, pasa material adicional bajo la regla, lo que provoca que esta se eleve. El aumento resultante en el espesor de la carpeta debe corregirse manualmente reduciendo el ángulo de ataque mediante las manivelas de control de espesor. Esto hace que la regla pivote alrededor de sus puntos de apoyo y opere con un ángulo de ataque más bajo. Este ajuste provoca desgaste acelerado en la placa delantera de la regla, porque la porción frontal de la regla realiza la mayor parte del trabajo de compactación y acabado, lo cual suele generar textura inconsistente en la carpeta. Además, la regla se asienta más cuando la pavimentadora se detiene entre camiones, porque su peso queda soportado únicamente en su parte frontal.

Cuando el strike-off se ajusta demasiado bajo, se reduce el espesor de la capa porque no se permite que suficiente mezcla pase bajo la regla. Para mantener el espesor adecuado, debe modificarse el ángulo de ataque, haciendo que la regla opere apoyada hacia su parte trasera, con

una ligera inclinación de "nariz hacia arriba". Esto incrementa el desgaste en el borde posterior de la regla y reduce el esfuerzo de compactación que esta aplica. También hace que la regla se asiente más cada vez que la pavimentadora se detiene, debido a la concentración del peso en un área menor.

La ubicación exacta del strike-off depende del fabricante y modelo de la pavimentadora, así como del espesor que se esté colocando. Para capas relativamente delgadas (1 pulgada [25 mm] o menos), el strike-off normalmente se coloca más bajo que cuando se colocan capas más gruesas. De manera similar, para capas espesas (mayores a 2 pulgadas [50 mm]), el conjunto del strike-off suele ajustarse ligeramente por encima de la posición normal. En términos generales, el strike-off se posiciona entre 3/16 y 1/2 pulgada (5 a 13 mm) por encima del plano inferior de la placa principal de la regla. No ocurre compactación de la mezcla debajo del strike-off.

7.3.6 Reglas vibratorias

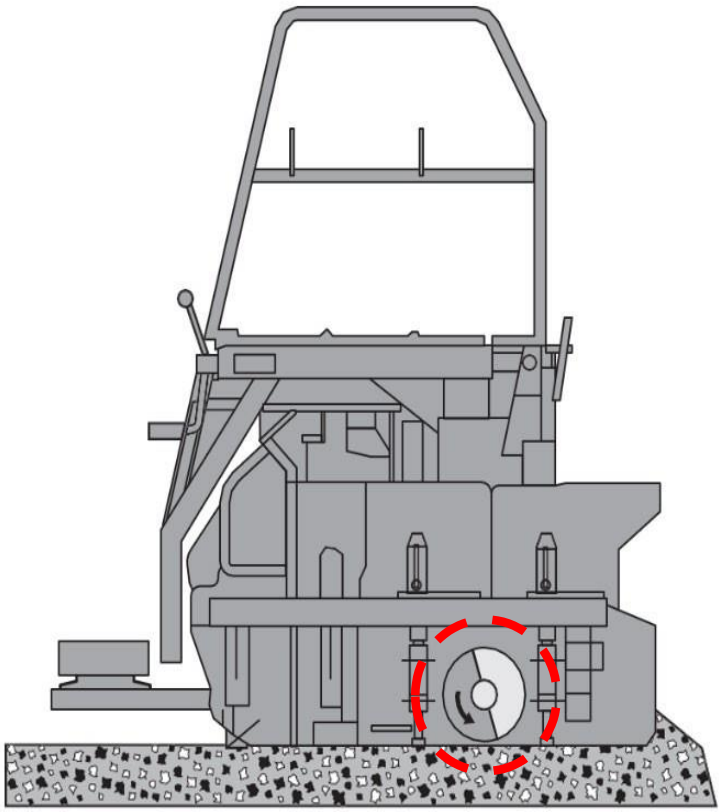
La cantidad de compactación que la regla imparte a la mezcla asfáltica es función de muchas variables. Las propiedades de la mezcla en sí son importantes: su rigidez, su temperatura y la cantidad de ligante asfáltico y humedad que contiene afectan la capacidad de la regla para densificar la mezcla. El grado de compactación logrado también se ve afectado por la cantidad de presión de apoyo aplicada a la mezcla por la regla, así como por el espesor de la capa que pasa bajo la regla.

La vibración de la regla se logra mediante un eje giratorio y un contrapeso. Dos elementos de la regla vibratoria (véase la Figura 98) contribuyen al grado de compactación alcanzado: la frecuencia de vibración (número de vibraciones por minuto) y la amplitud (cantidad de fuerza) impartida por la regla. Aumentar las revoluciones por minuto del eje incrementará la frecuencia de la vibración y el esfuerzo de compactación. Normalmente, los vibradores deben usarse en el ajuste de mayor frecuencia para obtener el máximo esfuerzo de compactación.

La amplitud aplicada está determinada por la ubicación de los pesos excéntricos en el eje. La posición de los pesos excéntricos puede modificarse para aumentar o disminuir la cantidad de esfuerzo de compactación aplicado. El ajuste de amplitud seleccionado generalmente está relacionado con el espesor de la capa que se está colocando: menor amplitud para capas más delgadas y mayor amplitud para capas más gruesas.

Los vibradores deben usarse en el ajuste de mayor frecuencia para obtener el máximo esfuerzo de compactación.

La densidad alcanzada por la regla de la pavimentadora también es función de la velocidad de la máquina. A medida que la pavimentadora se desplaza más rápido, la regla permanece menos tiempo sobre cualquier punto de la nueva capa, y la cantidad de esfuerzo de compactación aplicado por la regla disminuye. Puede esperarse que aproximadamente entre el 70 y el 90 por ciento de la densidad máxima teórica (TMD) de la mezcla asfáltica se obtenga cuando la mezcla sale de debajo de la regla de la pavimentadora.



Fuente: Asphalt Institute

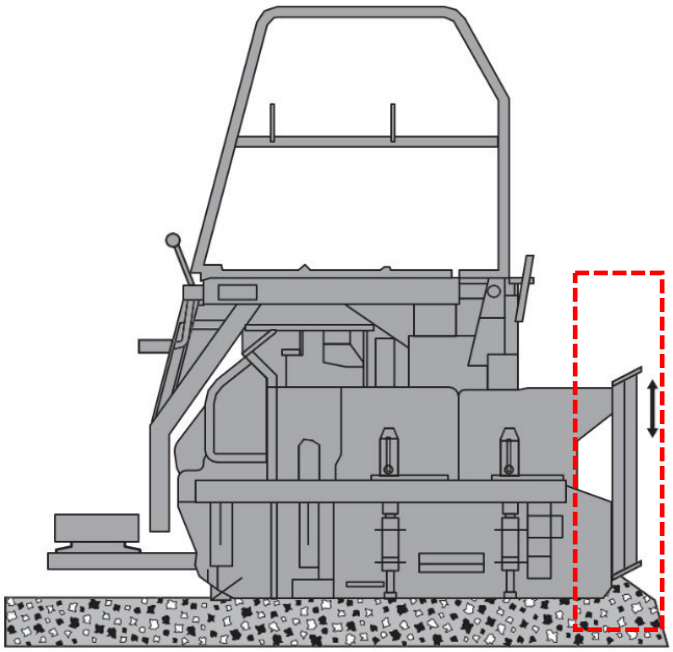
Figura 98. Regla vibratoria

7.3.7 Barras Apisonadoras

Algunas reglas tienen barras apisonadoras verticales en su borde delantero (véase la Figura 99) que cumplen una doble función: nivelan la mezcla y la dirigen bajo la regla. Esto a menudo puede producir una mayor densidad inicial que una regla vibratoria.

A velocidades de pavimentación más altas, el sistema de barras apisonadoras no tiene suficiente tiempo para introducir el material bajo la regla. La velocidad a la cual esto se convierte en un problema varía según las propiedades de la mezcla y el espesor de la capa. Esto puede resultar en una textura superficial donde los agregados parecen arrastrarse detrás de la regla o incluso en una superficie de pavimento asfáltico desgarrada. Algunas pavimentadoras tienen reglas con barras apisonadoras dobles una segunda línea de barras detrás de la primera. Aunque una segunda barra apisonadora puede añadir mayor densidad inicial y permitir velocidades de pavimentación más altas, hace que la regla sea mecánicamente más complicada y más difícil de mantener.

Para funcionar correctamente, las barras apisonadoras deben ajustarse y mantenerse según las recomendaciones del fabricante. Normalmente, las barras apisonadoras sobresalen por debajo del borde delantero de la regla lo suficiente como para enganchar una uña, es decir, entre 1/64 y 1/32 de pulgada (0.4–0.8 mm). Debe aplicarse un agente desmoldante aprobado por la agencia al final de cada turno para evitar que las barras se traben al inicio del siguiente ciclo de pavimentación.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura GG. Regla con barra de apisonamiento

7.3.8 Calentadores de regla

La regla está equipada con dos o más calentadores, o quemadores, dependiendo de la antigüedad y el modelo de la pavimentadora. El propósito de los calentadores es precalentar la placa en la parte inferior de la regla a la temperatura de la mezcla que se está colocando. La regla debe calentarse antes de comenzar las operaciones de pavimentación y en cualquier momento en que la regla haya estado elevada fuera de la mezcla durante un período prolongado. La regla debe estar a casi la misma temperatura que el material asfáltico que pasa por debajo de ella para garantizar que la mezcla no se adhiera a la placa de la regla y se desgarre, lo que daría una textura rugosa a la capa. Una regla calentada adecuadamente proporciona una textura más uniforme a la superficie de la capa y un espesor más consistente. Para precalentar la regla, los calentadores suelen funcionar durante un periodo de 10 a 20 minutos antes de que comience la operación de colocación. Se debe tener cuidado de evitar el sobrecalentamiento, que puede provocar una deformación permanente de la placa de la regla. Los calentadores eléctricos de la regla tienden a proporcionar un calentamiento más uniforme de la misma. Por lo general, en los 10 minutos siguientes al inicio de la pavimentación, la temperatura de la placa de la regla ha aumentado hasta el punto en que generalmente puede mantenerse gracias a la temperatura de la mezcla que pasa por debajo de ella. Por lo tanto, los calentadores no son necesarios y se apagan. Un error muy común es pensar que los calentadores pueden utilizarse para calentar el material frío a medida que pasa por debajo de la regla. Esto simplemente no es cierto.

Solo la superficie superior de la mezcla se calienta ligeramente, mientras que la parte inferior de la solera puede sobrecalentarse hasta el punto de deformarse. Por las mismas razones, el

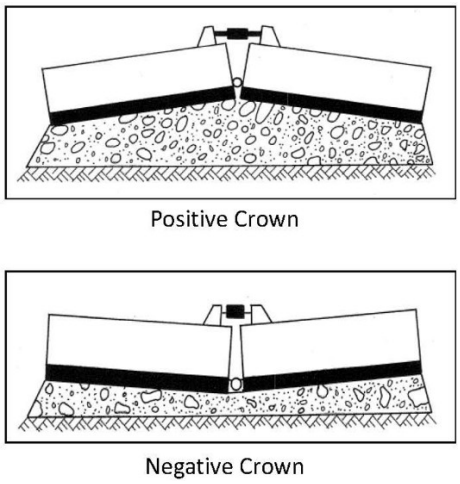
Un error muy extendido es pensar que los calentadores pueden utilizarse para calentar el material frío a medida que pasa por debajo de la regla.

calentador de solera no deben utilizarse para aumentar la temperatura de la mezcla que se encuentra debajo de la solera durante un periodo de tiempo mientras se espera la llegada del siguiente camión de transporte.

7.3.9 Corona de la regla

Al pavimentar la corona en la sección transversal del pavimento (como la línea central del pavimento), la regla se puede inclinar en su centro para proporcionar la pendiente correcta (véase la figura 100). La cantidad de corona que se puede introducir en la regla varía en función de la anchura de la regla y de la marca y el modelo del equipo.

La corona se ajusta normalmente mediante un dispositivo de tensor para flexionar la parte inferior de la regla y conferirle el grado de corona deseado. Cuando se utilizan extensiones rígidas, el perfil transversal de la estera se puede modificar en cualquiera de los puntos donde se unen las extensiones (por ejemplo, al pavimentar un arcén con una pendiente diferente). Si se utiliza unaregla extensible hidráulicamente con la pavimentadora, la corona se puede introducir no solo en el centro de la regla, sino también en los puntos entre la regla y las extensiones hidráulicas.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 100. Corona de la regla

Al pavimentar secciones planas (un carril a la vez), algunos fabricantes de pavimentadoras recomiendan que la regla se curve ligeramente, de adelante hacia atrás en su centro, para facilitar el paso de la mezcla por debajo de la regla y obtener una textura más uniforme en la capa de asfalto. Este proceso implica colocar la corona delantera de la regla ligeramente por encima de la corona trasera de la regla. En general, la corona delantera debe ser mayor que la trasera, pero la diferencia depende de la marca de la pavimentadora y del tipo de regla. Normalmente, el ajuste de la corona delantera es de 1/32 a 3/16 pulgadas (1 a 5 mm) mayor que el ajuste de la corona trasera, siendo 1/8 pulgadas (3 mm) la diferencia media entre los ajustes de las coronas. En el caso de las reglas extensibles hidráulicamente, algunos fabricantes de pavimentadoras no recomiendan ajustar ninguna cantidad de corona delantera en el borde delantero de la regla.

Debido a las diferentes recomendaciones para las distintas marcas y modelos de pavimentadoras, se recomienda consultar el manual de instrucciones del fabricante antes de colocar la corona en la regla.

7.4 CONTROL DE NIVELACIÓN

El objetivo del sistema de control de nivelación es mantener los puntos de remolque de la regla en una línea de tracción suave mientras la pavimentadora avanza. La acción de autonivelación de la regla se produce de forma continua a medida que el tractor avanza por la carretera. El espesor de la capa de asfalto que se coloca viene determinado por la reacción de la regla a la ubicación de los puntos de remolque, la velocidad del tractor y la altura del material en la cámara del sinfín. Toda la operación se lleva a cabo sin necesidad de cambiar las manivelas de control de espesor de la regla.

7.4.1 Control manual de nivelación

Es fácil visualizar que si una pavimentadora fuera una unidad de un solo eje con los puntos de remolque fijados al eje, la elevación del punto de remolque seguiría directamente la superficie existente, con una mejora mínima en la suavidad final de la superficie. Debido a que las pavimentadoras tienen múltiples ejes, con los puntos de remolque aproximadamente en el centro de la distancia entre ejes de la pavimentadora, la longitud de la distancia entre ejes de la pavimentadora se convierte en la referencia.
Así, basándose en la combinación del movimiento del punto de remolque, que es la media de la distancia entre ejes, y la reacción retardada de la regla, bajo el control manual de la regla, esta compensará las desviaciones en la rugosidad colocando más mezcla en los puntos bajos y menos mezcla en los puntos altos de la superficie existente.

7.4.2 Control automático de nivelación

Los controles automáticos de nivelación permiten que el punto de remolque se refiera a un sistema de referencia que no está directamente vinculado al movimiento de la unidad tractora, sino a una línea de referencia establecida por un esquí móvil, una cuerda preestablecida o un control remoto (tridimensional [3-D]). Los controles automáticos de nivelación ajustan los puntos de remolque hacia arriba o hacia abajo para mantener una diferencia de altura constante entre el punto de remolque y la línea de referencia.
Mantener la elevación de los puntos de remolque constante en relación directa con la referencia permite que la regla mantenga un ángulo de ataque más constante, lo que a su vez proporciona una capa más uniforme detrás de la regla.
Hay muchos factores que afectan a la uniformidad de la mezcla colocada por la pavimentadora. El uso de controles automáticos de la regla por sí solo no garantiza que la capa construida sea lisa. Es extremadamente importante prestar la debida atención al funcionamiento de la pavimentadora, tal y como se describe en la sección 7.3, para obtener una capa de pavimento lisa. Además, es importante recordar que, dado que la regla flotante coloca más mezcla en los puntos bajos y menos en los puntos altos, la

Es importante recordar que, dado que la regla flotante coloca más mezcla en los puntos bajos y menos en los puntos altos, la compactación diferencial de la mezcla asfáltica dará como resultado una superficie compactada más rugosa que la superficie colocada.

Compactación diferencial de la mezcla asfáltica dará como resultado una superficie compactada más rugosa que la superficie colocada.

7.4.2.1 Referencias móviles

Existen varios tipos de referencias móviles (a veces denominadas «esquís»). El objetivo de un sistema de referencia móvil es promediar los efectos de los cambios de pendiente en una superficie existente a una distancia mayor que la obtenida solo con la distancia entre ejes de la pavimentadora.

7.4.2.2 Referencia de nivelación con viga flotante

Una referencia móvil de viga flotante es el sistema de referencia de nivelación más común (véase la figura 101). Consiste en una viga rígida con una serie de patas con resortes fijadas a la parte inferior de la viga. Una o más de las patas pueden moverse sobre un único punto alto o bajo de la superficie del pavimento sin alterar la pendiente general de la viga a lo largo de su longitud. Los «pies» articulados pueden
«caminar» sobre pequeñas ondulaciones o rocas sueltas en la carretera sin alterar la pendiente de la viga. El sistema de referencia de viga flotante promediará la variación de la pendiente existente en 30-40 pies (9-12 m).

Fuente: Caterpillar Inc.

Figura 101. Referencia de nivelación con viga flotante

7.4.2.3 Referencia de nivelación Sonic-Tracker

Un sistema de referencia móvil con rastreador sónico fija una viga rígida al lateral de la pavimentadora que sostiene múltiples sensores sónicos a lo largo de su longitud (véase la figura 102). Los sensores dirigen ondas sónicas hacia abajo que rebotan en la superficie. El eco se cronometra para establecer la altura del sensor sobre la superficie de referencia. Las múltiples lecturas de altura se promedian continuamente para proporcionar una línea de referencia.

Fuente: Caterpillar Inc.

Figura 102. Referencia de grado Sonic-Tracker

7.4.2.4 Referencias de grado combinadas

Cuanto más larga sea la referencia de nivel utilizada, mejor compensará la pavimentadora las variaciones en la superficie del pavimento existente. Por consiguiente, los pavimentos más lisos se construyen utilizando una combinación de un sistema de referencia móvil sobre la regla que detecta el nivel existente delante de la pavimentadora y se extiende sobre la regla para detectar la nueva capa que se coloca detrás de la regla (véase la figura 103). Dado que la nueva capa es significativamente más lisa que la superficie del pavimento existente, la mayoría de las variaciones detectadas se limitan a las medidas por los sensores frontales. Los sistemas combinados pueden estar formados por vigas flotantes individuales conectadas por una estructura rígida o por un cable con resorte tensado sobre la regla. Este tipo de sistema puede alcanzar entre 12 y 18 m (40 y 60 pies) de longitud.

Fuente: Brian K. Wood

Figura 103. Sensor de nivelación sobre la regla y comprobación de la pendiente transversal

7.4.2.5 *Referencias de nivel fijo*

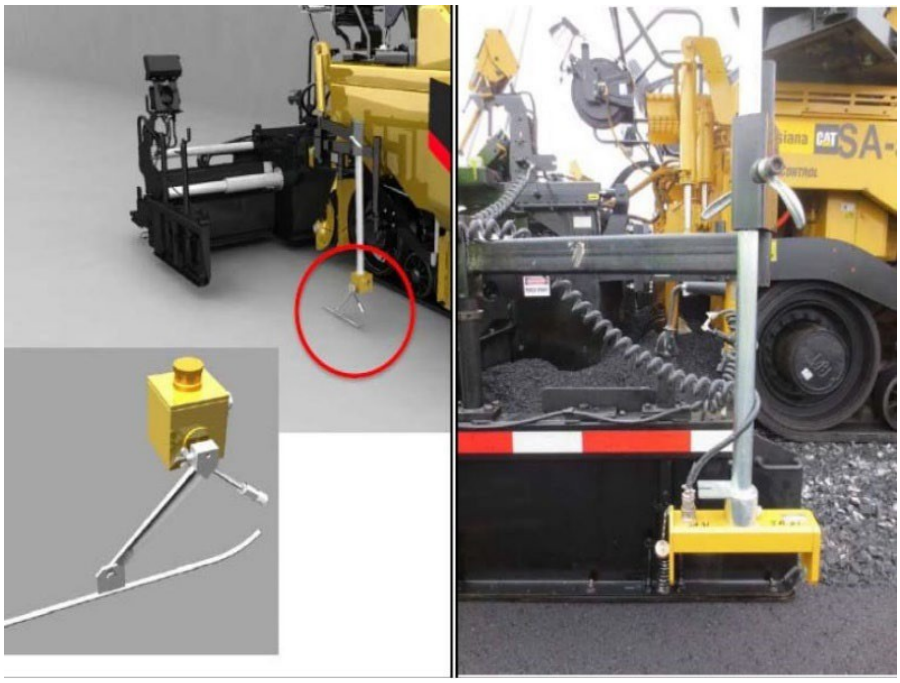
Una referencia de nivel fijo se refiere a un método de referencia de nivel que duplica una superficie o perfil existente, principalmente una referencia de un solo punto (zapata de coincidencia o sensor sin contacto) o una referencia de cordel fijo. El objetivo es duplicar o reflejar la referencia respectiva.

7.4.2.6 *Referencia de un solo punto (zapata de ajuste)*

El objetivo de la referencia de nivelación de un solo punto es duplicar el nivel de una superficie adyacente, como un carril contiguo, un bordillo y una cuneta, o una capa superficial inferior. Un dispositivo de referencia de un solo punto puede ser una zapata de ajuste o un sensor de nivelación sin contacto único.

Las referencias de nivel fijo que utilizan un solo dispositivo deben utilizarse con precaución, ya que las anomalías, como el derrame de la mezcla y los guijarros o las entradas de drenaje en los bordillos y cunetas, pueden crear un perfil irregular que se reflejará directamente en la superficie de pavimentación adyacente.

La ubicación del sensor de un solo punto en la pavimentadora influirá en la respuesta de esta ante los cambios de nivel. Es importante recordar que el sensor está calibrado para detectar una referencia específica o medir una distancia. A medida que una varilla o una zapata de ajuste atraviesa una referencia, el punto de remolque mantendrá una distancia constante con una tolerancia muy pequeña. Un sensor sin contacto mide constantemente una distancia, y el punto de remolque se mueve para mantenerse dentro de una tolerancia muy estrecha con respecto a una distancia predeterminada. Ambos tipos de sensores, que se muestran en la figura 104, solicitarán continuamente que los puntos de remolque cambien hasta que la desviación con el sensor vuelva a su «rango de confort».



Fuente: Caterpillar, Inc.

Figura 104. Referencia de nivelación de un solo punto

La colocación cerca del punto de remolque fija la distancia entre la referencia de nivelación y la elevación del punto de remolque. Al sensor y al punto de remolque realmente no les importa lo que haga la regla, ya que esta se desplaza una longitud de brazo de remolque por detrás del punto de remolque. El hecho de que la regla necesite una longitud de brazo de remolque para alcanzar el 65 % del angulo del cambio de ataque situará la regla muy cerca de donde debería estar a medida que avanza el pavimentado. La colocación del sensor de un solo punto en el punto de remolque dará lugar a movimientos más pequeños del punto de remolque y a un pavimento más uniforme, pero es posible que no siempre coincida exactamente con la referencia de nivelación.

Las referencias de grado fijo que utilizan un solo dispositivo deben utilizarse con precaucíon, ya que las anomalías, como el derrame de la mezcla y los guijarros o las entradas de drenaje en los bordillos y cunetas, pueden crear un perfil irregular que se reflejará directamente en la superficie de pavimentación adyacente.

Cuando el sensor se coloca en la parte trasera del brazo de remolque, cerca del sinfín, la reacción del punto de remolque es bastante diferente. Cuando el sensor se monta cerca del sinfín o de la regla, el sensor sigue más de cerca la posición de la regla. Cuando el sensor sale de su rango de confort, solicita un ajuste de la elevación del punto de remolque. Pero como la regla tarda en reaccionar al cambio del punto de remolque, el sensor sigue solicitando más movimiento del punto de remolque; por lo tanto, el punto de remolque sigue moviéndose hasta que el sensor queda satisfecho. Estos movimientos de la altura del punto de remolque son mayores y más rápidos en comparación con la reacción del punto de remolque con el sensor situado en el punto de remolque. El resultado es que la regla alcanza rápidamente la nueva elevación solicitada por el sensor. La colocación de un sensor de un solo punto cerca del sinfín permitirá obtener la coincidencia continua más cercana con la referencia de nivel, pero la suavidad puede verse reducida.

Al colocar la segunda capa de una capa base o una capa de aglomerado, puede ser mejor utilizar un patín de referencia móvil más largo en lugar de una zapata de ajuste de juntas. La referencia móvil proporcionará una mejor información para construir una superficie de pavimento lisa que un sensor de un solo punto. Si se ha logrado una suavidad suficiente en las capas inferiores, un dispositivo de ajuste de un solo punto sería una opción adecuada para ajustar las superficies adyacentes o la elevación específica para la capa final.

7.4.2.7 Cuerda fija

El uso de un cordel tensado, como se muestra en la figura 105, permite colocar la capa de asfalto lo más lisa posible detrás de la regla de la pavimentadora. El cordel puede ser de alambre o de nailon. Este método de proporcionar información sobre la elevación ofrece la referencia más consistente para los puntos de remolque de la pavimentadora, lo que permite ajustar con gran precisión la pendiente predeterminada si se utilizan correctamente los controles.

Fuente: Applied Research Associates, Inc. (ARA)

Figura 105. Línea de referencia en un proyecto de aeródromo

Desafortunadamente, existen varios obstáculos para la implementación exitosa del control con cordeles fijos. Los más notables son que su instalación y mantenimiento son muy costosos y requieren mucho tiempo. Además, el cordel debe mantenerse muy tenso y sin ser alterado por el personal y el equipo a lo largo de secciones extensas del proyecto. Por lo tanto, en la gran mayoría de los proyectos de pavimentación de carreteras no se utiliza un cordel erigido.

Sin embargo, las cuerdas fijas pueden ser muy útiles cuando son importantes los perfiles longitudinales y transversales junto con los puntos de elevación finales, como en los aeródromos. Los proyectos especiales, como los circuitos de carreras u otras aplicaciones con curvas superelevadas críticas, pueden ser buenos candidatos para las referencias de nivelación con cuerdas fijas.

Es importante señalar que el establecimiento de una plataforma de pavimentación lisa contribuye de manera significativa a una operación de colocación uniforme y equilibrada. El uso de controles automáticos en las fresadoras mejora el rendimiento de la mezcla, la suavidad y la densidad in situ.

7.4.3 Control de pendiente

El pavimentado que se realiza con controles automáticos de la regla, tal y como se describe en la sección 7.4.2, suele llevarse a cabo mediante una combinación de control de nivelación en un lado de la pavimentadora y control de pendiente para determinar la nivelación en el otro lado de la máquina. El control de pendiente funciona mediante un sensor de pendiente situado en una viga transversal entre los dos brazos laterales de la regla. La pendiente transversal se regula mediante un dispositivo pendular que forma parte del sistema de control de pendiente. El grado de pendiente transversal requerido se introduce simplemente en el controlador de pendiente, como se muestra en la figura 106.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 106. Un controlador moderno de pendiente transversal

Un lado de la regla se controla mediante sensores de nivelación, mientras que el otro se controla mediante un controlador de pendiente. En casi todos los casos, el borde interior o la línea central de la capa acabada se controla mediante la nivelación y el borde exterior mediante la pendiente. Es muy difícil hacer coincidir la junta de la línea central si se utiliza el control de pendiente para controlar el borde interior de un carril pavimentado. Es extremadamente difícil, si no imposible, en secciones de varios carriles.

Cuando se utiliza el control de pendiente, el espesor de la capa en el lado de la máquina controlado por el sensor de pendiente puede variar en profundidad, dependiendo del estado de la superficie existente. Independientemente del estado de la superficie existente, el controlador de pendiente mantiene una pendiente transversal constante de la capa acabada que sale de la pavimentadora, independientemente del espesor resultante de la capa de asfalto colocada. Si hay un punto alto en la superficie del pavimento actual, el controlador de pendiente hace que la regla coloque menos material sobre ese lugar; si hay un punto bajo en el pavimento existente, el controlador de pendiente hace que la regla deposite más mezcla en ese lugar. Es una buena práctica comprobar la pendiente del carril de forma rutinaria con un nivel de carpintero u otro método.

Cuando se utiliza correctamente, un controlador de pendiente coloca con gran precisión una capa con una superficie con la pendiente exacta. Sin embargo, si la subcapa es irregular, se producirá una compactación diferencial y la superficie final no será uniforme en toda la sección después del apisonado. Una capa base correctamente preparada o corregida que se ajuste al perfil longitudinal y transversal mejorará en gran medida la uniformidad y el equilibrio de la operación de pavimentación. En el caso de pavimentos anchos, como las pistas de los aeropuertos, es recomendable comprobar continuamente la elevación del borde exterior de la mezcla que se está colocando. Aunque el uso de uno o varios cordeles a lo largo de un pavimento ancho puede ayudar a proporcionar la pendiente transversal adecuada, a menudo se utilizan dos esquís de referencia móviles (que controlan ambos lados de la pavimentadora).

7.4.4 Control remoto de nivelación y pendiente (pavimentación 3D)

El control tradicional de la pendiente y el peralte se conoce a menudo como pavimentación bidimensional (2D). La pavimentación tridimensional (3D) permite que la operación de colocación alcance una elevación específica mientras se mantiene la pendiente y el peralte longitudinales. Para lograr un resultado exacto es necesario controlar las capas inferiores de la sección de pavimento. Dado que la colocación de un espesor de capa no uniforme da lugar a un deslizamiento diferencial, un proyecto exitoso comienza con una colocación precisa de la capa base o una operación de fresado.

El pavimentado 3D es un proceso en el que los puntos de remolque de la pavimentadora se controlan automáticamente mediante un archivo electrónico que contiene todos los datos de nivelación, pendiente y elevación. Estos datos pueden proceder del archivo de diseño original del proyecto o capturarse y registrarse durante la construcción del proyecto, por ejemplo, durante la preparación de la subbase, la colocación de la capa base o las operaciones de fresado.

El pavimentado 3D comienza con uno o dos prismas situados en la regla, como se muestra en la figura 107. Estos prismas se montan a una altura fija y medida por encima de la regla. Los prismas son rastreados constantemente por una estación total universal in situ.

Fuente: SITECH Construction Systems

Figura 107. Receptores duales en una pavimentadora

Dependiendo del lugar del proyecto, puede haber varias estaciones totales, ya que deben mantener la línea de visión con la pavimentadora y tienen un alcance limitado de entre 150 y 300 m, dependiendo del proveedor del sistema. Las estaciones totales (que se muestran en la figura 108) miden constantemente la ubicación del prisma de la pavimentadora y transmiten los datos de posición a un receptor y una unidad de control situada en la pavimentadora. El controlador procesa los datos de posición recibidos y controla la altura del punto de remolque para mantener la regla en las elevaciones finales del archivo de datos.

Algunos sistemas, a menudo denominados «control de nivelación 3D», pueden utilizar un solo prisma para controlar la línea de nivelación (en sustitución del esquí) en un lado de la regla, mientras que el otro extremo de la regla se controla mediante el controlador de pendiente o la zapata de ajuste. Otros sistemas utilizan dos prismas, uno a cada lado de la regla, para proporcionar un control 3D completo.

Las estaciones totales se encuentran en puntos de control a lo largo del proyecto, con coordenadas y elevaciones conocidas predeterminadas para cada una. El pavimentado 3D se utiliza normalmente en proyectos estratégicos con una huella limitada debido al alcance limitado de las estaciones totales. Se pueden esperar excelentes resultados en todo tipo de proyectos, pero puede resultar difícil de ejecutar en proyectos de recubrimiento largos y de gran tonelaje, mientras que los proyectos de aeródromos son excelentes candidatos para el pavimentado 3D.

Fuente: JP Excavating, Inc.

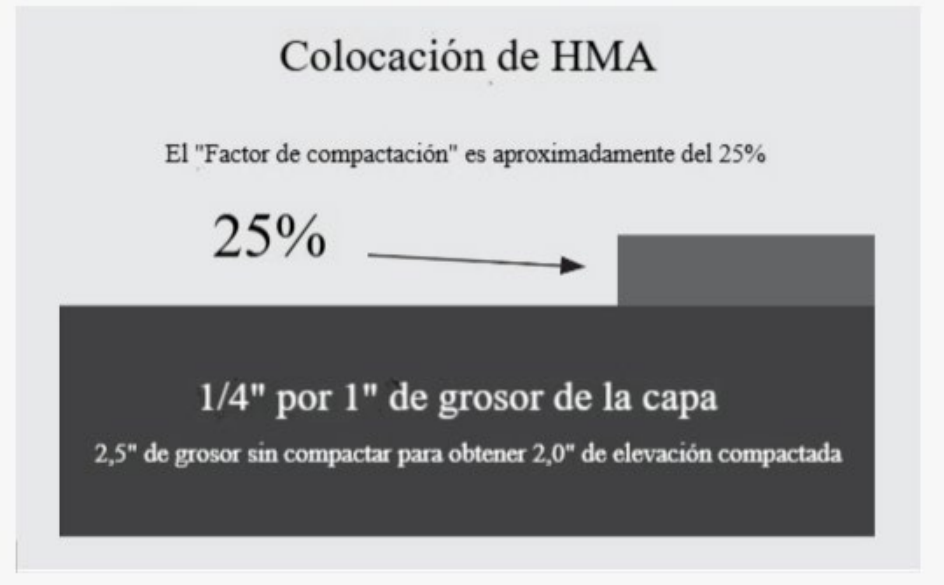
Figura 108. Estación total universal para pavimentadoras

7.5 ESPESOR DE LA CAPA

Ver vídeo:
Cálculos de rendimiento

Después de extender el material asfáltico y alisarlo con la regla, se encuentra en un estado «suelto», aunque haya recibido una compactación inicial mediante la barra compactadora o la regla vibratoria. Es fundamental que el espesor de la mezcla suelta después de su colocación sea suficiente para permitir la consolidación mediante el proceso de compactación, de modo que el espesor final cumpla con el especificado en los planos del proyecto.

Para lograrlo, se debe tener en cuenta un factor de asentamiento para cada material. Este factor varía en función del tipo de mezcla, siendo el factor de asentamiento habitual (para una mezcla típica de grano denso) de aproximadamente el 25 % (véase la figura 109). Por ejemplo, suponiendo un factor de asentamiento del 25 % en un espesor de capa compactada de 2 pulgadas, el espesor colocado por la pavimentadora debe ser un 25 % más grueso, es decir, 2,5 pulgadas. Cuando se colocan materiales con huecos y de granulometría abierta, probablemente sea más preciso un factor de asentamiento de alrededor del 15 %. Durante las operaciones de pavimentación, es una buena práctica que el operador de la regla mida regularmente el espesor de la capa suelta directamente detrás de la pavimentadora. Cuando sea necesario, se deben realizar ajustes en el espesor de la capa para garantizar que se coloquen las cantidades adecuadas. En el capítulo 9, sección 9.2.2, se analiza con más detalle la construcción de juntas transversales en el arranque.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 10G. Factor de reducción empírico para mezclas de grano denso

La tasa de extensión es un cálculo útil que los inspectores de obra y los capataces de pavimentación pueden utilizar para confirmar que la pavimentadora está correctamente configurada y colocando la cantidad adecuada de material. Se basa en la información sobre el peso unitario proporcionada por el laboratorio y se expresa en libras por yarda cuadrada de material por cada pulgada de espesor compactado. Estas unidades se expresan normalmente en libras/yarda^2 -pulgadas.

La fórmula para calcular la tasa de esparcimiento es la siguiente:

$$\text{Tasa de esparcimiento} = \text{Peso Unitario} \left(\frac{lbs}{ft^3}\right) x \frac{1\ ft}{12\ in} x \frac{9\ ft^2}{1\ yd^2} = \frac{lbs}{yd^2\ in}$$

Con este factor, las cantidades se pueden calcular fácilmente de la siguiente manera en cualquier número de términos basados en el ancho, los pies y la profundidad y las pulgadas compactadas para una distancia determinada:

Toneladas/pie lineal (T/LF), que es útil para determinar el tonelaje necesario para mover una pavimentadora a cierta distancia.

Toneladas/estación del proyecto (T/sta) para comparar las cantidades con las hojas del plan del proyecto.

Toneladas/milla (T/MI) para comparar con las cantidades totales del contrato.

7.6 ESTABLECIMIENTO DE LA VELOCIDAD DE LA ASFALTADORA

La planificación es necesaria para construir un pavimento asfáltico de alta calidad, y comienza coordinando la cantidad de material necesario, el número de camiones necesarios y la cantidad de compactación necesaria antes de que la temperatura de la mezcla descienda por debajo de los niveles compactables. Una velocidad uniforme de la pavimentadora es esencial para mantener intacto el plan de pavimentación. El operador de la pavimentadora debe estar capacitado para supervisar la velocidad de llegada del material, el flujo de material a través de la pavimentadora y el ritmo del tren de compactación, e intentar mantener las tres operaciones en equilibrio.

El objetivo principal del operador de la pavimentadora debe ser mantener un ritmo acorde con el ritmo del tren de compactación y no preocuparse por las oleadas de camiones de entrega que llegan delante de la pavimentadora. Al liberar los camiones de la pavimentadora de forma ordenada, el operador de la pavimentadora puede ayudar a mantener la separación entre los camiones que regresan a la planta.

Para equilibrar una operación de pavimentación que proporcione un movimiento continuo hacia adelante y una colocación uniforme del pavimento, se deben realizar cálculos para estimar lo siguiente:

El número de camiones necesarios para entregar la mezcla.

La velocidad de pavimentación.

La capacidad de producción del tren de compactación.

Una operación de pavimentación de autopistas perfectamente equilibrada funcionará de forma continua, sin interrupciones, al mismo ritmo de producción que la planta de asfalto. El número de camiones necesarios se trata en la sección 6.2 y se supone que es suficiente para el funcionamiento continuo en el siguiente ejemplo.

Cálculo de la velocidad de la pavimentadora

Supuestos:

Producción de la planta = 350 T/h
Peso unitario compactado = 150,2 lb/pie³
Espesor de la capa compactada = 2,0 pulgadas
Ancho de pavimentación = 14 pies

Determinar la tasa de esparcimiento:

$$150.2\left(\frac{lbs}{ft^3}\right)x\left(\frac{1\,ft}{12\,in}\right)x\left(\frac{9\,ft^2}{yd^2}\right)=112.65\frac{lbs}{yd^2\,in}$$

O calcular directamente las toneladas por pie lineal de mezcla:

$$(1\,ft)\,x\,(14\,ft)\,x\left(\frac{2\,in}{12\frac{in}{ft}}\right)x\,150.2\frac{lbs}{ft^3}\,x\,\frac{1\,T}{2000\,lbs}=\,0.17523\,\frac{T}{ft}$$

1 tonelada de mezcla cubrirá:

$$\frac{1\,T}{0.17523\,\frac{T}{ft}}\;\approx\;5.71\,ft$$

La distancia recorrida en 1 hora equivale a:

$$350\,\frac{T}{hr}\,x\,5.71\,\frac{ft}{T}=1{,}998.5\,\frac{ft}{hr}$$

Calcular la velocidad de pavimentación en pies por minuto:

$$\frac{1{,}998.5\ ft}{60\ min} = 33.3\ \frac{ft}{min}$$

Este cálculo es una cifra teórica que supone un funcionamiento continuo sin paradas de la pavimentadora. Si se prevén paradas de la pavimentadora, estas deben tenerse en cuenta mediante un factor de eficiencia. Para mantener la misma tasa de producción por hora, la pavimentadora deberá moverse más rápido. Si se prevé que la pavimentadora estará en movimiento el 90 % del tiempo, esto debe tenerse en cuenta con un factor de eficiencia de 0,90, como se muestra a continuación:

$$\frac{33.3\ \frac{ft}{min}}{0.90} = 37.0\ \frac{ft}{min}$$

Se puede observar que, aunque la pavimentadora esté parada el 10 % del tiempo, no es necesario aumentar mucho la velocidad de avance para recuperar el tiempo perdido. Si la tasa de producción de compactación (tratada en la sección 8.5.2) no es capaz de mantener la velocidad de pavimentación calculada, será necesario reducir la velocidad de la pavimentadora y la producción de la planta, o añadir rodillos adicionales para mantener la producción y alcanzar la densidad especificada.

7.7 OPERACIONES DE PAVIMENTACIÓN RELACIONADAS

Aunque las pavimentadoras de asfalto colocarán la mayor parte de la mezcla en un proyecto, siempre habrá pequeñas áreas inaccesibles donde no sea práctico o donde las pavimentadoras no puedan maniobrar para colocar la mezcla necesaria.

7.7.1 Operaciones de extendido manual

Las pequeñas reparaciones y parches, los pequeños canales de drenaje, las áreas de ancho variable, como estrechos conos, radios, filetes, etc., son ejemplos de áreas que requieren esparcimiento y acabado manual.

Se debe prestar atención al proceso cuando se coloca y se extiende a mano. La mezcla debe entregarse de manera uniforme en pequeños montones para evitar la segregación de la mezcla, colocando los montones de suministro de manera que los paleros y rastrilladores tengan que mover la mayor parte del material la menor distancia posible. Debe haber suficiente espacio para que los trabajadores no tengan que pisar la mezcla recién colocada. Nunca se debe permitir esparcir o lanzar la mezcla con palas, ya que se producirá segregación. Los pequeños montones deben extenderse con palas y rastrillos/rastrillos de mano, desechando cualquier grumo de mezcla que se haya formado y que no se deshaga fácilmente al golpearlo con el borde de la pala. Después de colocar la mezcla de manera uniforme, y antes de comenzar a apisonar, se debe revisar la superficie con una regla y corregir todas las irregularidades. En días fríos, se debe prestar especial atención a la temperatura de la mezcla. La colocación manual de la mezcla acelera el enfriamiento del material, y la compactación debe comenzar lo antes posible para garantizar el tiempo adecuado para la compactación.

Es importante comprender que la mezcla extendida a mano no ha sido precompactada mediante una regla vibratoria o una barra de apisonamiento, y que el factor de deslizamiento de la mezcla puede ser significativamente mayor que el de la mezcla colocada por una pavimentadora. No es raro que se produzca un deslizamiento del 30 al 50 % con el material colocado a mano.

7.7.2 Operaciones complementarias y accesorios

Las operaciones de pavimentación complementarias incluyen la ampliación de carreteras, los arcenes y las curvas peraltadas. En algunos casos, como la ampliación y la construcción de arcenes, se dispone de equipos y accesorios de pavimentación especialmente diseñados para realizar el trabajo de forma fácil y eficiente. Otros elementos viales, como bordillos de asfalto, diques, cunetas, aliviaderos y taludes, se incluyen cada vez más en los contratos de pavimentación. Para estos trabajos, puede ser necesario utilizar equipos especiales o mezclas de asfalto especiales (o ambos).

7.7.3 Ampliación de carreteras y arcenes

Las calzadas típicas de dos carriles tienen una anchura de entre 7,3 y 7,9 m (24-28 pies). Muchos miles de kilómetros de carreteras principales tienen una anchura y un espesor insuficientes para cumplir con las normas actuales. Para obtener más información sobre las normas geométricas, consulte «A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 7.ª edición, 2018», comúnmente conocida como el «Green Book», de la AASHTO para mas información.

Por razones de seguridad, la evaluación y la planificación pueden mejorar considerablemente la alineación original de carreteras en mal estado que necesitan ser ensanchadas antes de reforzarlas con recubrimientos. El ensanchamiento puede variar desde unos pocos pies (más de 1 m) en un lado de la calzada hasta la adición de carriles de tráfico de ancho completo en ambos lados. Por razones de seguridad, se debe mantener un control adecuado del tráfico durante toda la construcción. Las obras nunca deben realizarse en ambos lados de la calzada al mismo tiempo y se debe evitar la excavación de zanjas abiertas de longitud excesiva.
El ensanchamiento requiere la excavación de zanjas con la anchura y profundidad adecuadas, normalmente mediante plantillas o accesorios para una motoniveladora, de modo que las paredes y la base queden limpias y alineadas con la línea y la pendiente. Para excavaciones más amplias, una excavadora continua o una fresadora que carga camiones mientras corta la zanja con la línea y la pendiente adecuadas puede acelerar el proceso. Los contratistas deben compactar la subrasante con el equipo adecuado hasta que quede firme y libre de material suelto, y la compactación supere los requisitos mínimos. Las referencias típicas de compactación son la prueba Proctor modificada o la prueba California Bearing Ratio para confirmar el cumplimiento de la densidad requerida. Los trabajadores deben recortar y limpiar los bordes del pavimento existente casi verticalmente y eliminar toda la suciedad y los materiales extraños, y luego rociar el borde con una cantidad abundante de capa adhesiva para adherir la nueva mezcla al pavimento existente. A continuación, deben colocar la base del pavimento asfáltico en capas y compactarla hasta alcanzar la densidad requerida. Será necesario seleccionar el equipo de compactación adecuado: placas vibratorias para zanjas estrechas, rodillos especiales para zanjas disponibles en diferentes anchuras o rodillos de tamaño completo para secciones más anchas.

Al añadir arcenes a una carretera existente, los contratistas deben seguir los mismos procedimientos y precauciones que se utilizan para la ampliación de carreteras. Por razones de seguridad, es importante colocar suficiente mezcla para garantizar que, tras el apisonado, la altura del nuevo arcén coincida con el borde del pavimento existente, a fin de evitar desniveles o encharcamientos.

Cuando los arcenes pavimentados forman parte de la construcción inicial, los contratistas deben seguir los procedimientos para la pavimentación de la calzada principal. Se debe considerar el uso de reglas de ancho variable para pavimentar los arcenes al mismo tiempo que la calzada principal y eliminar la junta longitudinal del borde.

7.7.4 Peralte

En las nuevas construcciones, pavimentar secciones curvas con pendientes transversales sobreelevadas no suele ser un problema. El material preparado para la base y/o los cimientos suele estar peraltado o inclinado de la misma manera que el nuevo pavimento. Esto permite colocar el mismo espesor uniforme en las secciones curvas o peraltadas que en las secciones tangentes o rectas. A medida que la pavimentadora avanza por la transición a la sección peraltada y vuelve a salir de ella, la pavimentadora y la regla se inclinan en consecuencia sobre los cimientos preparados, y se requiere poco o ningún ajuste en los controles de la regla.

Cuando construya un pavimento con peralte sobre una base o subrasante plana o coronada, utilice capas de espesor variable para construir el pavimento. Las pavimentadoras equipadas con controles automáticos de pendiente permiten «ajustar» la pendiente transversal a medida que la pavimentadora se desplaza por la curva con peralte. Los sensores instalados en una línea de referencia fija o móvil mantienen el control de la pendiente de la regla más cercana al sensor. La profundidad en el otro lado depende del ajuste de la pendiente transversal.

Cuando la pavimentadora llega al punto en el que la pendiente comienza a cambiar y pasa a una sección con peralte, unas estacas u otros marcadores situados en los carriles adyacentes indican las pendientes transversales necesarias para que el operador de la regla las ajuste continuamente a medida que la pavimentadora avanza por la transición. El cambio en la pendiente transversal es gradual, y los pequeños errores en el ajuste no afectarán a la calidad de rodadura del pavimento. Una vez que la pavimentadora entra en la pendiente transversal con peralte completo, el ajuste de la pendiente se mantendrá igual en todo momento. A continuación, a medida que la pavimentadora sale de la sección totalmente peraltada, la pendiente transversal se ajusta gradualmente utilizando el mismo procedimiento, pero a la inversa.

7.8 LISTAS DE VERIFICACIÓN DE MEJORES PRÁCTICAS

La siguiente lista incluye puntos importantes que deben tener en cuenta el capataz de pavimentación, superintendente o inspector.

7.8.1 Directrices generales

- Nunca deje que la tolva se vacíe entre cargas. (El nivel de material en la tolva no debe permitir que caiga por debajo de la parte superior de la abertura del túnel).

- Establezca y mantenga una velocidad de pavimentación continua. (Establezca la velocidad equilibrando el suministro de material con el proceso de compactación).
- Controle la cabeza del material en la zona del sinfín con una precisión de ±1 pulgada (±25 mm).
- No permita que los camiones choquen contra la pavimentadora.
- No derrame material en la pendiente delante de la pavimentadora (al descargar directamente en la tolva de la pavimentadora o limpiar las puertas traseras de los camiones).
- No pliegue las alas de la tolva entre cargas. Es mejor plegar las alas solo cuando se limpie la tolva, ya sea al final de un turno o debido a una interrupción prolongada del trabajo.
- Practique buenas técnicas de arranque y parada de la pavimentadora.
- Elimine la sobrecorrección de los tornillos de profundidad.

  Asegúrese de que las compuertas finales estén ajustadas correctamente y en contacto con el pavimento existente.
- Utilice las mejores prácticas para la compactación del pavimento asfáltico in situ y asegúrese de que todas las marcas de los rodillos se alisen (véase el capítulo 9).

7.8.2 Establecimiento y mantenimiento de la altura adecuada del material

- Ajuste las compuertas de flujo y/o las cintas transportadoras de listones para mantener una velocidad continua del sinfín.
- Asegúrese de que los sensores de alimentación de material funcionan correctamente.
- Instale extensiones de túnel de modo que queden a una distancia de entre 12 y 18 pulgadas de la placa final.
- Baje el sinfín hasta una posición situada aproximadamente entre 5 y 10 cm por encima de la placa de enrasado.
- Coloque, caliente y nivele correctamente la regla sobre los bloques de arranque.
- Cargue la cámara del sinfín con material, dejando que los sinfines giren hasta que la cámara se llene hasta la altura del eje del sinfín, hasta la compuerta final. Se detienen automáticamente. (Utilice una pala si es necesario para rellenar cualquier hueco en el exterior cerca de la placa final).
- Comience a pavimentar, realizando ajustes en la cabeza del material para adaptarse al ancho, la profundidad y la velocidad de pavimentación, mientras mantiene una cabeza de material constante en los sinfines.

7.8.3 Reducción de la segregación en la tolva de la pavimentadora

- Observe las unidades de transporte que llegan para verificar que se sigan los procedimientos de carga adecuados.
- Minimice los derrames delante de la pavimentadora.
- No permita que el nivel de material en la tolva caiga por debajo de la parte superior de la abertura del túnel.
- Doble correctamente las alas de la tolva solo cuando sea necesario.
- Una vez finalizada la pavimentación:
    - Mueva la pavimentadora a un área de limpieza designada.
    - Doble las alas de la tolva para facilitar su limpieza.
    - Transporte la mezcla fría o segregada desde las alas de la tolva de vuelta a la planta para reciclar.

7.8.4 Reducción de las imperfecciones en la textura de la capa base

- Mantenga el equipo en buenas condiciones y realice todas las reparaciones necesarias de manera oportuna.
- Ajuste los sinfines a la altura adecuada para la mezcla y el espesor de elevación que se va a colocar.
- Ajuste las extensiones atornilladas e hidráulicas de la regla en un plano uniforme.
- Compruebe y ajuste la corona de la regla delantera y trasera para asegurarse de que cumple los requisitos del fabricante del equipo.
- Asegúrese de que las extensiones del túnel y de la regla estén en su lugar y a una distancia de entre 12 y 18 pulgadas de la placa final.
- Establezca y mantenga una velocidad de pavimentación equilibrada y una altura constante del material.

8. Compactación

8.1 INTRODUCCIÓN

El último paso en la construcción de pavimentos asfálticos es el proceso de compactación. La compactación es el proceso mediante el cual se comprime (o densifica) la capa de asfalto recién colocada para reducir los huecos de aire que hay en ella. La compactación se lleva a cabo mientras la capa aún se encuentra a temperatura elevada, directamente detrás de la pavimentadora. Las fuerzas de compactación iniciales son aplicadas por la regla de la pavimentadora durante la colocación, y la compactación final se logra mediante rodillos de diversos tipos. Durante el proceso de compactación, las partículas de agregado de la capa se reorientan cada vez más cerca unas de otras y se fijan en su lugar para proporcionar un esqueleto resistente a la mezcla asfáltica.

La compactación es el factor más importante en el rendimiento de un pavimento flexible. Una compactación adecuada de la mezcla aumenta la vida útil, disminuye la deformación permanente (formado de roderas), reduce la oxidación o el envejecimiento, disminuye los daños causados por la humedad, aumenta la resistencia y la estabilidad, y disminuye el agrietamiento a bajas temperaturas.

La compactación es el factor más importante en el rendimiento de un pavimento flexible.

Las investigaciones y la experiencia han demostrado sistemáticamente que las mezclas asfálticas construidas con materiales marginales pero bien compactadas tienen una buena oportunidad para obtener un rendimiento aceptable. Sin embargo, las mezclas que utilizan materiales de primera calidad y tienen excelentes diseños volumétricos, pero están mal compactadas, son más propensas a tener un rendimiento deficiente. Por lo tanto, es importante que una agencia incluya en sus especificaciones un requisito de densidad que dé como resultado un contenido de huecos de aire óptimo y uniforme después de la compactación.

8.2 DEFINICIONES

Es importante comprender la terminología relacionada con los pavimentos asfálticos. A continuación, se ofrecen las siguientes definiciones.

Compactación: proceso que reduce el volumen de una mezcla asfáltica, reduciendo sus huecos de aire y reorientando sus áridos para que queden cada vez más juntos, lo que induce el entrelazamiento de los áridos. Esto forma lo que se conoce como el esqueleto de áridos de una mezcla, que es su principal fuente de resistencia.

Densidad: la masa de un material por unidad de volumen. En el ámbito del pavimento asfáltico, el término densidad suele referirse a la densidad relativa.

Densidad de laboratorio: valor calculado que multiplica la gravedad específica aparente medida (G_{mb}) por la densidad del agua (62,4 lb/ft^3 o 1000 g/L) en los huecos de aire de diseño, normalmente según las normas AASHTO T 166 o ASTM D 2726.

Densidad máxima teórica (DMT): valor calculado basado en el procedimiento de ensayo de laboratorio que sigue la norma AASHTO T 209. En este ensayo se determina la gravedad específica de una muestra de mezcla asfáltica sin huecos de aire; para este valor se utiliza el símbolo $_{Gmm}$. Para obtener su densidad, este valor se multiplica por la densidad del agua (62,4 lb/ft^3 o 1000 g/L). Este valor se conoce a menudo como gravedad específica de Rice o densidad de Rice si se multiplica por la densidad del agua. La prueba lleva el nombre de Jim Rice, quien fue el desarrollador del procedimiento de prueba.

Densidad relativa: el porcentaje de una densidad de referencia. Casi universalmente, la densidad de referencia para los pavimentos asfálticos es la DMT.

8.3 RODILLOS

Ver vídeo:
Tipos de rodillos

Si bien el primer implemento para inducir la densificación es la regla En la pavimentadora, son los rodillos los que suelen realizar la mayor parte de la compactación. Los tipos de regla más comunes son, con diferencia, las reglas vibratorias. Por lo general, estas son ajustables para maximizar su eficacia. El operador de la regla debe seguir siempre el procedimiento indicado por el fabricante de la misma para lograrlo. El rango de densidad que se puede esperar detrás de una regla vibratoria será de alrededor del 70 al 90 por ciento para la mayoría de las mezclas construidas con los espesores adecuados.

Hay reglas más comunes en Europa que se conocen como reglas de alta densidad. Estas utilizan barras de apisonamiento para lograr densidades más altas en comparación con las reglas vibratorias. Sin embargo, para obtener esta mayor densidad y producir la suavidad deseada, la pavimentadora debe avanzar a velocidades notablemente más lentas que las más comunes en las pavimentadoras equipadas con reglas vibratorias.

Como se ha indicado anteriormente, los rodillos son la herramienta que realiza la mayor parte de la compactación. Los rodillos pueden tener diferentes configuraciones. Tradicionalmente, los equipos de pavimentación han utilizado cuatro tipos comunes: rodillos estáticos de acero, neumáticos, vibratorios de acero y combinados. Aunque estos siguen siendo comunes, ahora existen otros tipos adicionales, como los rodillos oscilantes y los rodillos neumáticos vibratorios. Además, los rodillos pueden estar equipados con tecnología de compactación inteligente (véase la sección 8.3.7).

8.3.1 Rodillos estáticos con ruedas de acero

Los rodillos estáticos con ruedas de acero (o estáticos) tienen tambores de acero en dos configuraciones diferentes. Los rodillos de doble tambor son más comunes, pero también hay disponibles configuraciones de tres ruedas (véase la figura 110). Una característica de la configuración de tres ruedas y tambor dividido es que la velocidad de rotación del tambor puede cambiar de un lado a otro al girar para reducir el desgarro o el agrietamiento.

Fuente: Dynapac

Figura 110. Rodillo estático de acero

La presión de contacto del rodillo es la principal fuente de energía compactadora en los rodillos de acero. La presión de contacto se ve afectada por el peso del rodillo, que suele ser de entre 3 y 14 toneladas (2,7-12,7 t), y por la anchura del tambor, que suele ser de entre 40 y 54 pulgadas (102-137 cm). Los rodillos estáticos suelen poder lastrarse para aumentar su masa. Para ello se suele utilizar agua. Si existe posibilidad de congelación, se debe incluir el uso de un anticongelante adecuado.

El peso del rodillo se transmite a la mezcla a través de la presión de contacto que se ejerce bajo los tambores. Por lo tanto, la presión de contacto bajo los tambores no debe exceder la capacidad de soporte de la mezcla que se está compactando. Las mezclas más duras y estables que se utilizan en autopistas o aeropuertos de gran volumen pueden requerir rodillos más pesados. Las mezclas menos estables que se utilizan en entradas de vehículos, estacionamientos y otras situaciones de bajo volumen pueden requerir rodillos más pequeños y ligeros. En la mayoría de los casos, la capa de asfalto es lo suficientemente estable como para permitir el uso de rodillos con una fuerza de contacto elevada.

Dado que los rodillos con ruedas de acero varían en anchura y peso, se puede utilizar un cálculo sencillo para cuantificar el esfuerzo de compactación aplicado por los rodillos estáticos. Dividiendo el peso del rodillo por la anchura de todos los tambores, se puede determinar la carga lineal estática total, expresada en libras por pulgada lineal (PLI) o kilogramos por centímetro (kg/cm) del rodillo. Por ejemplo, un rodillo de 8 toneladas con dos tambores de 50 pulgadas de ancho tendría un PLI de 160. El PLI se puede utilizar para combinar rodillos de diferentes tamaños y fabricantes al establecer un patrón de rodadura. Los rodillos estáticos de doble tambor de acero suelen proporcionar un mínimo de 250 PLI (44,6 kg/cm), y los rodillos estáticos grandes de tres ruedas suelen proporcionar un mínimo de 350 PLI (62,5 kg/cm), lo que los convierte en rodillos de descomposición o intermedios eficaces.

Las dos formas de ajustar la fuerza de compactación de un rodillo de ruedas de acero son ajustar el lastre (peso) del rodillo y la velocidad. Añadir peso, o lastre, aplicará una mayor fuerza sobre la mezcla sin compactar con cada pasada. Ajustar la velocidad afecta al tiempo de permanencia en cada punto de la superficie. Las velocidades de rodadura más lentas aumentan el tiempo de permanencia y aumentan la densidad con cada pasada del rodillo.

Todos los rodillos con ruedas de acero (estáticos y vibratorios) utilizados para el laminado incluyen un sistema de rociado de agua y rascadores para humedecer los tambores y evitar que la mezcla se adhiera a ellos. Se debe comprobar el desgaste de la superficie de cada tambor con una regla metálica y no se debe utilizar si se han formado surcos o picaduras en el tambor de laminación. Además, los rascadores deben inspeccionarse periódicamente y sustituirse si están excesivamente desgastados.

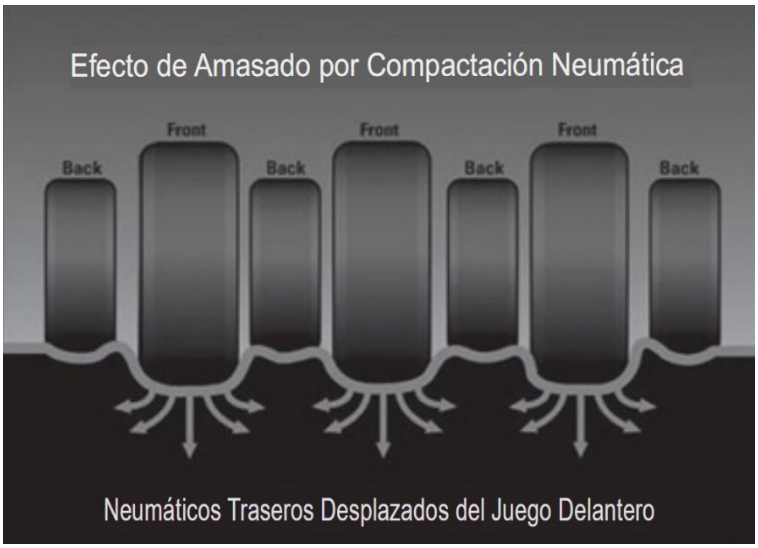
8.3.2 Rodillos con neumáticos

Los rodillos neumáticos (véase la figura 111), comúnmente conocidos como rodillos con neumáticos de goma, están equipados con neumáticos de goma en lugar de tambores de acero. Por lo general, los rodillos con neumáticos de goma están equipados con tres a cinco neumáticos en el eje delantero y cuatro a seis neumáticos en el eje trasero. Las ruedas pueden moverse hacia arriba y hacia abajo de forma semiindependiente entre sí. A diferencia de los rodillos con ruedas de acero, la superficie de los rodillos con neumáticos de goma se ajusta a la forma de la superficie subyacente. La posición intermedia es la fase más común en la que se utilizan los rodillos neumáticos.

Fuente: Volvo

Figura 111. Rodillo neumático

Las ruedas oscilantes y los neumáticos de goma conformados ejercen una presión constante en todos los puntos de la nueva capa y realizan una acción de amasado que manipula y compacta la mezcla de forma diferente a un rodillo de ruedas de acero. La figura 112 ilustra la acción de amasado de un rodillo de neumáticos de goma. Las flechas ilustran las líneas de fuerza típicas en la capa.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 112. Fuerzas del rodillo neumático (de goma)

Los rodillos con neumáticos de goma funcionan bien en superficies irregulares, como las capas de nivelación, ya que los neumáticos ejercen una presión constante y no pasan por encima de los puntos bajos como lo hacen los rodillos de tambor de acero. Su acción de amasado tiende a apretar y densificar la superficie más que los rodillos de tambor de acero, lo que reduce la permeabilidad. Los rodillos neumáticos pueden proporcionar una mayor densidad. Suelen ser más eficaces para compactar mezclas blandas. En mezclas blandas, puede ser necesario reducir la presión de aire de los neumáticos.

Los rodillos con neumáticos de goma pueden estar equipados con ruedas de 15, 17, 20 o 24 pulgadas (380, 430, 510 o 610 mm) de diámetro y deben tener neumáticos lisos para la compactación del asfalto. Todos los neumáticos deben tener la misma clasificación de capas y la misma presión de inflado, preferiblemente del mismo modelo y del mismo fabricante.

La presión de contacto de los neumáticos se calcula dividiendo la carga de la rueda entre el área de contacto del neumático con la superficie del pavimento. El índice de capas del neumático determina las presiones de inflado máximas y mínimas. La presión de inflado afecta directamente al área de contacto y a la presión de contacto resultante. Utilizar los neumáticos en el extremo medio-bajo del rango de presión de inflado ayudará a mejorar la textura de la superficie al sellarla. Aumentar la presión de inflado de los neumáticos incrementa la fuerza de compactación del rodillo. Algunos rodillos neumáticos tienen la capacidad de cambiar la presión de los neumáticos y mantener automáticamente una presión preestablecida durante el funcionamiento.

Hay varias formas de ajustar la fuerza de compactación de un rodillo con neumáticos de goma. La primera es añadir o quitar lastre. La segunda es ajustar la presión de los neumáticos. La tercera es ajustar la velocidad, lo que afecta al tiempo de permanencia, al igual que en los rodillos con ruedas de acero. Al igual que en los rodillos de acero estáticos, las velocidades más lentas aumentan el esfuerzo de compactación de cada pasada.

Los rodillos neumáticos pueden utilizarse en la fase de descomposición de la compactación, pero es en la fase intermedia donde se utilizan más. La resistencia desigual del subsuelo puede ser más evidente cuando se utilizan rodillos con neumáticos de goma para la descomposición, ya que las ruedas individuales pueden ejercer una gran presión sobre pequeñas zonas débiles del subsuelo que los tambores de acero anchos y rígidos tienden a salvar.

Cuando se utiliza un rodillo con neumáticos de goma para el apisonado, el movimiento horizontal de la mezcla en la dirección de desplazamiento debe ser mínimo. Esto se debe a que cada neumático se aplana ligeramente al pasar por encima de la mezcla, lo que permite que casi toda la fuerza de compactación se ejerza verticalmente sobre la capa. Se produce un movimiento horizontal excesivo de la mezcla en la dirección de avance cuando el diámetro de los neumáticos es demasiado pequeño, los neumáticos están demasiado inflados o la mezcla no es lo suficientemente estable como para utilizar un rodillo de neumáticos de goma para la compactación.

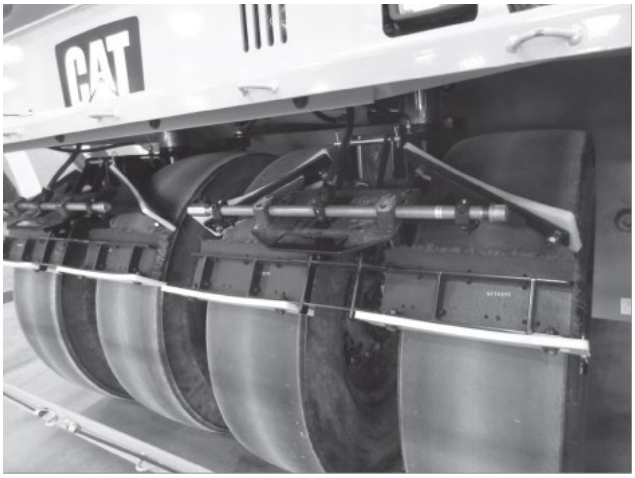
Se produce un cierto movimiento lateral horizontal de la mezcla bajo un rodillo de neumáticos de goma, en ángulo recto con respecto a la dirección de desplazamiento. Esto puede provocar pequeños baches o marcas de neumáticos en la superficie que pueden eliminarse con pasadas posteriores. La reducción de la presión de los neumáticos reducirá este desplazamiento lateral. La superficie puede parecer irregular, pero este aspecto es principalmente estético.

Los requisitos deseables para los rodillos de neumáticos de goma para la compactación inicial e intermedia son los siguientes:

- Peso por rueda de entre 3000 y 4500 libras (entre 1360 y 2141 kg).
- Diámetro mínimo de la rueda de 20 pulgadas (510 mm).
- Presión de inflado de los neumáticos de 70 a 75 psi (483 a 517 kPa) en frío y 90 psi (620 kPa) en caliente para la mayoría de las mezclas, pero la presión puede reducirse si es necesario para obtener una menor estabilidad o mezclas más blandas.

Es necesario abordar el problema de la acumulación de mezcla en los rodillos neumáticos. Las mezclas modificadas son las más propensas a acumularse. Es importante evitar o, al menos, reducir la cantidad de mezcla que se acumula en los rodillos con neumáticos de goma. La mejor manera de evitar la acumulación es mantener los neumáticos limpios y calientes, a una temperatura cercana a la de la capa asfáltica.

Los rodillos con neumáticos de goma más modernos están equipados con un sistema de pulverización de agua que se puede utilizar durante el calentamiento inicial para mitigar la acumulación de mezcla. Por lo general, cada neumático está equipado con una alfombrilla humectante que ayuda a distribuir el agua pulverizada sobre la superficie del neumático. Si se produce acumulación, puede ser útil añadir pequeñas dosis de detergente no espumoso o un agente desmoldeante soluble en agua aprobado al depósito de agua del rodillo. Todos los rodillos de neumáticos de goma también están equipados con rascadores para eliminar cualquier material de los neumáticos. La figura 113 ilustra dicho sistema.



Fuente: Caterpillar, Inc.

Figura 113. Sistema de pulverización de agua y alfombrillas humectantes en neumáticos.

El operador debe esforzarse por calentar los neumáticos y mantenerlos así antes de iniciar la compactación. Después de asegurarse de que las ruedas estén limpias, debe pasar el rodillo hacia adelante y hacia atrás sobre una estera colocada previamente durante al menos 10 minutos para calentar los neumáticos. Se recomienda utilizar faldones que rodeen los neumáticos, ya que esto ayudará tanto al proceso de calentamiento como a mantener los neumáticos calientes. Si se produce una pausa prolongada en la pavimentación, el operador debe mantener los neumáticos calientes manteniendo el rodillo en movimiento, tal y como se hizo durante el tiempo de calentamiento.

8.3.3 Rodillos vibratorios

Los rodillos vibratorios son el tipo de rodillos más versátil y común que se utiliza en el asfalto. Existen en una gran variedad de configuraciones. Los rodillos compactan mediante una combinación del peso y la vibración de sus tambores de acero. La vibración se produce mediante un peso excéntrico giratorio situado dentro del tambor (o tambores) y se puede ajustar tanto en amplitud como en frecuencia. Estos ajustes ayudan a adaptar el rodillo a la mezcla que se está pavimentando y a su espesor.

Fuente: Dynapac

Figura 114. Rodillo vibratorio de doble tambor

Los rodillos vibratorios son el tipo de rodillos más versátiles y comunes que se utilizan en el asfalto.

Hay dos modelos básicos de rodillos vibratorios: el de tambor simple y el de doble tambor. Normalmente, los rodillos vibratorios de tambor simple se utilizan para compactar tierra o áridos. mientras que los rodillos vibratorios de doble tambor (mostrados en la figura 114) se utilizan para compactar el asfalto. Ambos tambores suelen proporcionar propulsión y varían entre 0,9 y 1,5 m (3 y 5 pies) de diámetro y entre 1,2 y 2,1 m (4 y 7 pies) de ancho.

El peso estático, como su nombre indica, es simplemente el peso total de un rodillo vibratorio que funciona en modo estático o no vibratorio. Los rodillos vibratorios varían en peso estático entre 2,5 y 18 toneladas (2,3 y 16,4 t). Las anchuras varían entre 40 y 84 pulgadas (102 y 214 cm). Su peso estático en términos de anchura del tambor suele ser de entre 160 y 180 PLI (29 y 32 kg/cm).

La frecuencia es la velocidad a la que se producen los impactos de vibración generados por los pesos excéntricos giratorios. La frecuencia se expresa en vibraciones por minuto (VPM) o hercios (Hz). Las frecuencias típicas de los rodillos utilizados para la compactación del asfalto oscilan entre 2500 y más de 4000 VPM (42 a 67 Hz). El movimiento de alta frecuencia del tambor pone en movimiento las partículas de áridos de la mezcla, lo que les permite deslizarse entre sí más fácilmente bajo la fuerza compactadora del tambor. La regla general es utilizar el ajuste de frecuencia más alto disponible. La alta frecuencia permite que el rodillo funcione con mayor eficiencia a cualquier velocidad de avance en comparación con frecuencias más bajas.

La mayoría de los rodillos vibratorios están equipados con un indicador o medidor de VPM en el panel de control que es visible para el operador. Debido al desgaste y al entorno extremo, estos medidores pueden descalibrarse y perder precisión muy rápidamente. Un tacómetro digital o vibratorio de lengüeta portátil es una buena herramienta QC que se puede colocar sobre la capa de asfalto adyacente al rodillo vibratorio para medir con precisión las VPM.

La amplitud es el movimiento ascendente y descendente del tambor que se produce cuando el peso excéntrico gira en su interior. La posición de los pesos es ajustable y puede espaciarse uniformemente alrededor del eje o colocarse completamente en un lado. Cuando los pesos están espaciados uniformemente, están esencialmente en equilibrio y transmiten muy poca fuerza centrífuga al tambor. Al reposicionar y bloquear los pesos en un lado del eje, se desequilibra la fuerza centrífuga aplicada al tambor. Esta condición de desequilibrio transmite una fuerza ascendente y descendente al tambor que crea una fuerza de impacto. Cuanto mayor es la amplitud, mayor es la fuerza vertical y mayor es la fuerza de impacto ejercida sobre la mezcla.

Si bien algunos rodillos vibratorios pueden tener ajustes de amplitud alta y baja, los rodillos más nuevos ofrecen al operador una gama de ajustes de amplitud. Por lo general, el espesor de la capa, las propiedades del agregado de la mezcla y la compactabilidad de la mezcla son factores que se deben tener en cuenta al seleccionar el ajuste de amplitud adecuado para un proyecto. Por lo general, se recomienda comenzar con una frecuencia alta y una amplitud baja, y ajustar estos parámetros según sea necesario.

A medida que las capas se vuelven más gruesas, de alrededor de 2,5 pulgadas (65 mm) o más, o con mezclas más robustas, entonces puede ser necesario aumentar la amplitud en el arranque. Las aplicaciones de capas finas con un espesor compactado inferior a 1 pulgada (25 mm) se compactan generalmente con rodillos estáticos o rodillos vibratorios en modo estático.

El número de impactos por pie o metro debe establecerse como objetivo antes de comenzar la compactación. Este objetivo nunca debe ser inferior a 10 impactos por pie (IPF) (31 impactos por metro). Si se realiza un número de impactos inferior a este mínimo, se producirán ondulaciones o surcos. El rango objetivo típico es de 10 a 14 IPF (31 a 47 impactos por metro).

Los rodillos modernos proporcionan información en tiempo real al operador sobre la amplitud, la frecuencia y el IPF. Si un rodillo no cuenta con esta función, se puede utilizar el IPF deseado para calcular manualmente la velocidad de avance adecuada para alcanzar el objetivo. Por ejemplo, si el IPF mínimo deseado es 12 y la frecuencia del rodillo es 3600 VPM, la velocidad máxima del rodillo en millas por hora (mph) se calcula de la siguiente manera:

3,600 VPM / mínimo 12 IPF = máximo 300 pies por minuto, o máximo 3,4 mph

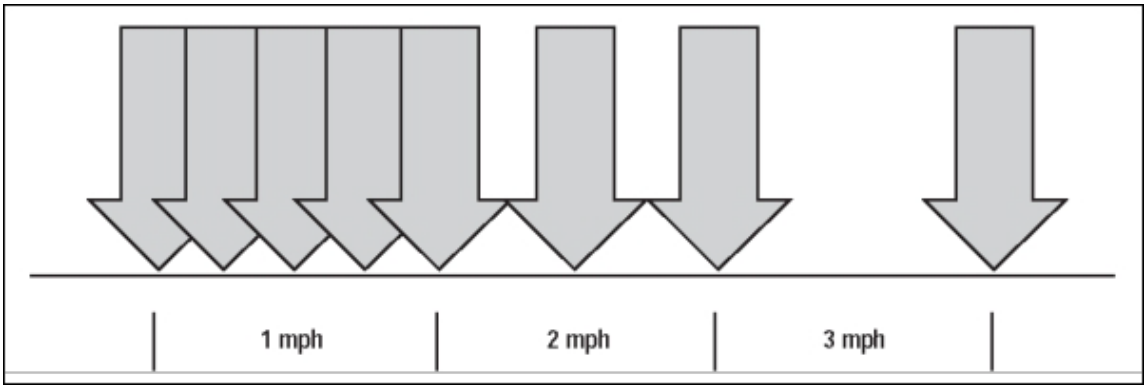
La creación de un gráfico como el que se muestra en la tabla 9 permite al operador ver fácilmente qué velocidad debe alcanzar para lograr la tasa de impacto adecuada. Se recomienda precaución cuando se aumentan las velocidades, incluso en rodillos de alta frecuencia. Las ventajas de su mayor frecuencia se maximizan cuando se alcanzan las velocidades tradicionales.

Tabla G. Velocidad máxima del rodillo frente a la frecuencia del tambor (para un rango de 10 a 14 IPF)

Hertz	VPM	Velocidad máxima del rodillo (mph) Impactos por pie lineal				
		10	11	12	13	14
40	2400	2,7	2,5	2,3	2,1	1,9
42	2520	2,9	2,6	2,4	2,2	2,0
44	2640	3,0	2,7	2,5	2,3	2,1
46	2760	3,1	2,9	2,6	2,4	2,2
48	2880	3,3	3,0	2,7	2,5	2,3
50	3000	3,4	3,1	2,8	2,6	2,4
52	3120	3,5	3,2	3,0	2,7	2,5
54	3240	3,7	3,3	3,1	2,8	2,6
56	3360	3,8	3,5	3,2	2,9	2,7
58	3480	4,0	3,6	3,3	3,0	2,8
60	3600	4,1	3,7	3,4	3,1	2,9
62	3720	4,2	3,8	3,5	3,3	3,0
64	3840	4,4	4,0	3,6	3,4	3,1
66	3960	4,5	4,1	3,8	3,5	3,2
68	4080	4,6	4,2	3,9	3,6	3,3
70	4200	4,8	4,3	4,0	3,7	3,4

En resumen, el espaciado de impacto, la vibración, la amplitud y la velocidad del rodillo pueden utilizarse para ajustar el esfuerzo de compactación de un rodillo vibratorio. Al reducir la velocidad de avance del rodillo, disminuye el espaciado entre impactos, lo que provoca un

aumento del número de IPF. A medida que aumenta la velocidad del rodillo para una frecuencia de vibración determinada, el espaciado entre impactos aumenta. La relación entre la velocidad y la frecuencia para obtener un IPF objetivo se ilustra en la figura 115. Para la compactación de mezclas asfálticas, los rodillos suelen funcionar con la frecuencia más alta disponible para ese rodillo, ajustando la velocidad del rodillo para cumplir con el espaciado entre impactos deseado.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 115. Relación entre la velocidad y la frecuencia de vibración

Los rodillos vibratorios pueden funcionar con ambos tambores, con el tambor delantero o trasero, o sin que vibre ninguno de los dos. Cada una de estas opciones tiene una situación en la que puede ser preferible. Cuando vibran ambos tambores, se produce el máximo esfuerzo de compactación por pasada. Esto puede utilizarse en una mezcla estable que requiera la mayor energía para alcanzar la densidad deseada.
Al hacer vibrar solo el tambor delantero, este alcanza mayor densidad y el tambor trasero crea un acabado más suave. Cambiarlo y hacer vibrar el tambor trasero puede ser una opción acertada para una mezcla con menos estabilidad o más ternura. El funcionamiento en modo estático de ambos tambores suele utilizarse para capas finas o en modo de acabado.

Prestar atención a la respuesta que ofrece una mezcla durante la compactación puede ayudar a densificar el pavimento, especialmente con rodillos vibratorios. Por ejemplo, una mezcla blanda puede responder bien a una o dos pasadas en modo estático, seguidas de vibraciones para alcanzar la densidad deseada. Sin embargo, si las condiciones cambian y la mezcla comienza a enfriarse más rápidamente, el exceso de energía utilizada puede triturar el agregado o descompactar la mezcla.

Es posible que sea necesario prestar especial atención al utilizar un rodillo vibratorio en pendientes pronunciadas. Especialmente en las primeras pasadas, se debe tener cuidado cuando el rodillo se desplaza cuesta abajo para que no vibre y empuje la mezcla por la pendiente.

8.3.4 Rodillos oscilantes

Los rodillos oscilantes (véase la figura 116) tienen una historia más larga en Europa, donde se desarrollaron, pero ahora también son herramientas comunes en el hemisferio occidental. Son rodillos de acero de doble tambor muy similares a los rodillos vibratorios. Un rodillo oscilante normalmente tendra un tambor oscilante y otro vibratorio; algunos tienen

oscilación en ambos tambores. Normalmente se utilizan con eficacia tanto en la fase de descomposición como en la fase intermedia. En lugar de una fuerza de compactación principalmente vertical, como la que generan los rodillos vibratorios, los rodillos oscilantes están equipados con dos unidades vibratorias que funcionan de forma sincronizada para crear un movimiento oscilante en el tambor. Este movimiento oscilante proporciona fuerzas de compactación tanto horizontales como verticales que se transmiten tangencialmente a la capa de asfalto.

Fuente: Wirtgen

Figura 116. Rodillo oscilante de doble tambor

Los rodillos oscilantes ejercen fuerzas de impacto verticales menores que los rodillos vibratorios, lo que puede ser conveniente cuando existe la preocupación de dañar la infraestructura cercana. Algunos ejemplos son los tableros de puentes o los lugares donde las instalaciones subterráneas, especialmente las más antiguas, no se encuentran a mucha profundidad. El uso de un rodillo oscilante para compactar una junta longitudinal también puede ser muy eficaz. Se ha demostrado que la acción de amasado menos agresiva de un rodillo oscilante permite obtener lecturas de alta densidad con menos posibilidades de desgarrar la capa. Además, cuando una mezcla tiene dificultades para responder favorablemente a los rodillos vibratorios, o a temperaturas de mezcla más bajas, un rodillo oscilante puede ser eficaz.

8.3.5 Rodillo combinado

Los rodillos combinados tienen dos tipos diferentes de rodillos (estáticos con ruedas de acero o vibratorios con ruedas de acero y neumáticos [con neumáticos de goma]) en el mismo rodillo (véase la figura 117). El tipo más común de rodillo combinado está equipado con un tambor vibratorio en la parte delantera y rodillos neumáticos con neumáticos de goma en la parte trasera. Esta configuración combina las ventajas de un tambor vibratorio de acero con la acción de amasado de los neumáticos. Por lo general, se utilizan en proyectos de pavimentación más pequeños, como aparcamientos, proyectos con superficies irregulares (bocas de alcantarilla, sumideros, etc.) y proyectos con pendientes pronunciadas. Algunos contratistas también los encuentran útiles para la compactación de accesos, donde su maniobrabilidad puede ser ventajosa.

Fuente: Bomag

Figura 117. Rodillo combinado

8.3.6 Rodillo neumático vibratorio

Los rodillos vibratorios con neumáticos de goma, como se muestra en la figura 118, son rodillos neumáticos que tienen la capacidad de hacer vibrar los neumáticos delanteros. Al igual que en el caso de los rodillos vibratorios con tambor de acero, las vibraciones se generan mediante un peso excéntrico giratorio situado en los ejes a lo largo del eje delantero. Tanto la frecuencia como la amplitud de las vibraciones se controlan independientemente del desplazamiento del rodillo y de la velocidad del motor. Este tipo de rodillo ofrece las ventajas tanto de la acción de amasado de los neumáticos de goma como de las fuerzas dinámicas de la compactación vibratoria. Esta configuración de rodillo es especialmente beneficiosa para el laminado y la compactación intermedios a lo largo de juntas confinadas.

Fuente: Sakai America, Inc.

Figura 118. Rodillo neumático vibratorio con neumáticos de goma

8.3.7 Compactación inteligente

La compactación inteligente (IC) es un proceso de compactación que utiliza tecnología avanzada para producir un producto densificado de manera más consistente. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de un sistema IC.

Figura 119. Un rodillo IC es un rodillo vibratorio con tecnología diseñada para proporcionar un mejor QCdurante el proceso de compactación. Los rodillos IC incorporan un sistema integrado para medir la rigidez, cartografía en tiempo real basada en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), sensores de temperatura infrarrojos (delanteros y traseros) y ordenadores a bordo. La pantalla del ordenador muestra mapas codificados por colores en tiempo real para realizar un seguimiento de la ubicación del rodillo, el número de pasadas, las temperaturas de la superficie y la rigidez relativa de los materiales compactados. El GPS proporciona datos extremadamente precisos sobre la ubicación del rodillo durante el proceso de compactación, que pueden combinarse con los datos de temperatura de la capa y del acelerómetro. Los tambores de los rodillos están equipados con acelerómetros para medir el movimiento del tambor durante la compactación y traducirlo en un valor de medición de compactación inteligente (ICMV). ICMV es un término genérico acuñado por la FHWA. Se trata de una medición en tiempo real de la rigidez relativa de la mezcla. Actualmente se prevén cinco niveles de ICMV, desde una solución empírica relativamente básica hasta una solución mecánica basada en métodos dinámicos e inteligencia artificial.

Fuente: Grupo Ammann

Figura 11G. Rodillo equipado con tecnología IC

El monitor del ordenador, que muestra un mapa del proyecto codificado por colores, está montado de manera que el operador pueda ver el ICMV, la temperatura de la estera y el número de pasadas del rodillo realizadas durante el proceso de compactación. La investigación y la experiencia sobre el terreno han demostrado que la tecnología IC mejora la consistencia de las pasadas del rodillo y la uniformidad de la compactación, simplemente al proporcionar esta información crítica en tiempo real al operador y al resto del personal del proyecto. La figura 120 muestra un rodillo vibratorio convencional de doble tambor equipado con tecnología IC.

Fuente: Sakai America, Inc.

Figura 120. Rodillo vibratorio de doble tambor equipado con tecnología IC

8.4 FACTORES QUE AFECTAN A LA COMPACTACIÓN

Ver vídeo:
Factores que afectan a la compactación

Hay muchos factores que influyen significativamente en la capacidad de compactar de manera eficaz y eficiente los pavimentos asfálticos, incluyendo los materiales utilizados, el diseño de la mezcla, la temperatura de la mezcla, las operaciones en el terreno y la calidad de los materiales sobre los que se coloca el asfalto. Los equipos de compactación y la propia operación de compactación también tienen un efecto importante y se tratarán más adelante en este capítulo.

Los siguientes factores influyen en la compactabilidad de una mezcla asfáltica y se tratarán en las siguientes secciones:

- Propiedades de la mezcla.
- Condiciones ambientales.
- Espesor de la capa (elevación).
- Subrasante y bases.

8.4.1 Propiedades de la mezcla

Las características físicas de una mezcla asfáltica desempeñan un papel importante en su compactabilidad. Comprender cómo estas propiedades afectan a la compactabilidad de la mezcla es importante para lograr una densidad adecuada de la capa. Las propiedades específicas del material que son de interés incluyen las siguientes:

- Propiedades y granulometría de los áridos.
- Propiedades del ligante asfáltico.
- Temperatura de la mezcla.

8.4.1.1 Propiedades y granulometría de los áridos

La gradación, la textura superficial y la angularidad de los áridos son las principales características de los áridos que afectan a la compactabilidad de la mezcla.

Las mezclas de granulometría abierta son muy fáciles de compactar, solo se asientan con un par de pasadas; no deben compactarse, ya que el alto contenido de huecos se cerraría. El alto contenido de masilla de la SMA facilita la compactación, además de que la cantidad de deslizamiento es menor (15 % en comparación con el 25 % de las mezclas de granulometría densa). Si bien pequeñas cantidades de arena natural alrededor del tamiz n.º 30 (0,60 mm) pueden mejorar la compactabilidad, un exceso de arena aumentará la fragilidad de la mezcla y puede dificultar su compactación. Además, a medida que aumenta el tamaño máximo del agregado o la cantidad de agregado grueso, sin un aumento correspondiente en el espesor de la capa, la mezcla será más resistente a la compactación.

Un aumento en la textura y la angularidad de la superficie también dificulta la compactación de la mezcla, pero proporciona una fricción vital entre el vehículo y el pavimento. El agregado triturado, de superficie rugosa y forma cúbica proporciona más fricción entre las partículas que el agregado redondo, liso y natural, lo que mejora el rendimiento a largo plazo.

El contenido de polvo, o material que pasa por el tamiz n.º 200 (0,075 mm), también puede afectar al proceso de compactación. Si el contenido de polvo cae por debajo del porcentaje objetivo del diseño de la mezcla, esta también puede volverse blanda y difícil de compactar. Si se supera el valor objetivo de polvo, la mezcla tenderá a agrietarse durante la compactación (véase el capítulo 12.9).

8.4.1.2 Propiedades del ligante asfáltico

El grado del ligante asfáltico afecta a la compactabilidad de la mezcla. Los grados de ligante más rígidos requieren un mayor esfuerzo de compactación en comparación con los grados más blandos. Los ligantes modificados proporcionan una mayor resistencia al desgaste y aumentan la durabilidad de la mezcla. Los ligantes más rígidos y modificados suelen requerir temperaturas de compactación más altas que los ligantes más blandos y sin modificar.

El uso de la tecnología WMA puede desempeñar un papel importante en el proceso de compactación. Existen muchos aditivos y técnicas WMA diferentes en el mercado. Aunque el objetivo inicial de la WMA era principalmente reducir las temperaturas de producción y construcción, los estudios de campo y las aplicaciones prácticas han demostrado que la WMA también puede ser una ayuda eficaz para la compactación. La eficacia de la WMA como ayuda para la compactación varía en función del tipo de tecnología WMA utilizada.

8.4.1.3 Temperatura de la mezcla

Dado que el ligante asfáltico es un material termoplástico, su viscosidad aumenta a medida que desciende la temperatura. Cuando el asfalto está fluido (caliente), actúa como lubricante que facilita la compactación de la mezcla. A medida que el ligante se enfría, se vuelve más rígido y une los áridos hasta el punto de que la capa asfáltica no es compactable.

La temperatura de una mezcla es clave para obtener densidad. Las mezclas asfálticas se compactan de manera más eficiente cuando se encuentran a temperaturas óptimas altas para esa mezcla o cerca de ellas. Las temperaturas típicas de compactación inicial suelen oscilar entre 275 y 310 °F (135 y 155 °C) tanto para ligantes no modificados como modificados. Debido a la amplia gama de grados de asfalto y modificadores, se recomienda al contratista que consulte con el proveedor del ligante el rango adecuado de mezcla y compactación.

Además, la compactación debe completarse antes de que la temperatura interna de la mezcla descienda por debajo de lo que se conoce como temperatura de cesación, que suele oscilar entre 175 y 180 °F (80 y 82 °C). Continuar compactando por debajo de estas temperaturas no suele aumentar significativamente la densidad y puede dañar la capa al fracturar el agregado. Por eso, la mayoría de las especificaciones indican que las operaciones de compactación deben cesar una vez que la mezcla se enfría hasta una temperatura mínima determinada.

Las temperaturas óptimas máximas y de cese (véase la sección 8.5.3 sobre la zona de rodadura) de una mezcla variarán de un proyecto a otro. Por lo tanto, es importante establecer las temperaturas objetivo de inicio y cese al comienzo de cada proyecto. El objetivo del contratista es completar la operación de compactación y obtener la densidad óptima en ese rango de temperaturas.

En condiciones climáticas adversas, como temperaturas ambientales frías y/o vientos fuertes, la estera se enfriará más rápidamente. En esos casos, a veces es aceptable elevar la temperatura de compactación inicial de la mezcla para aumentar el tiempo de densificación de la mezcla antes de que se enfríe. Sin embargo, el aumento de temperatura debe ser moderado y nunca superar la temperatura máxima de mezcla recomendada por el proveedor del aglutinante.

8.4.2 Condiciones ambientales

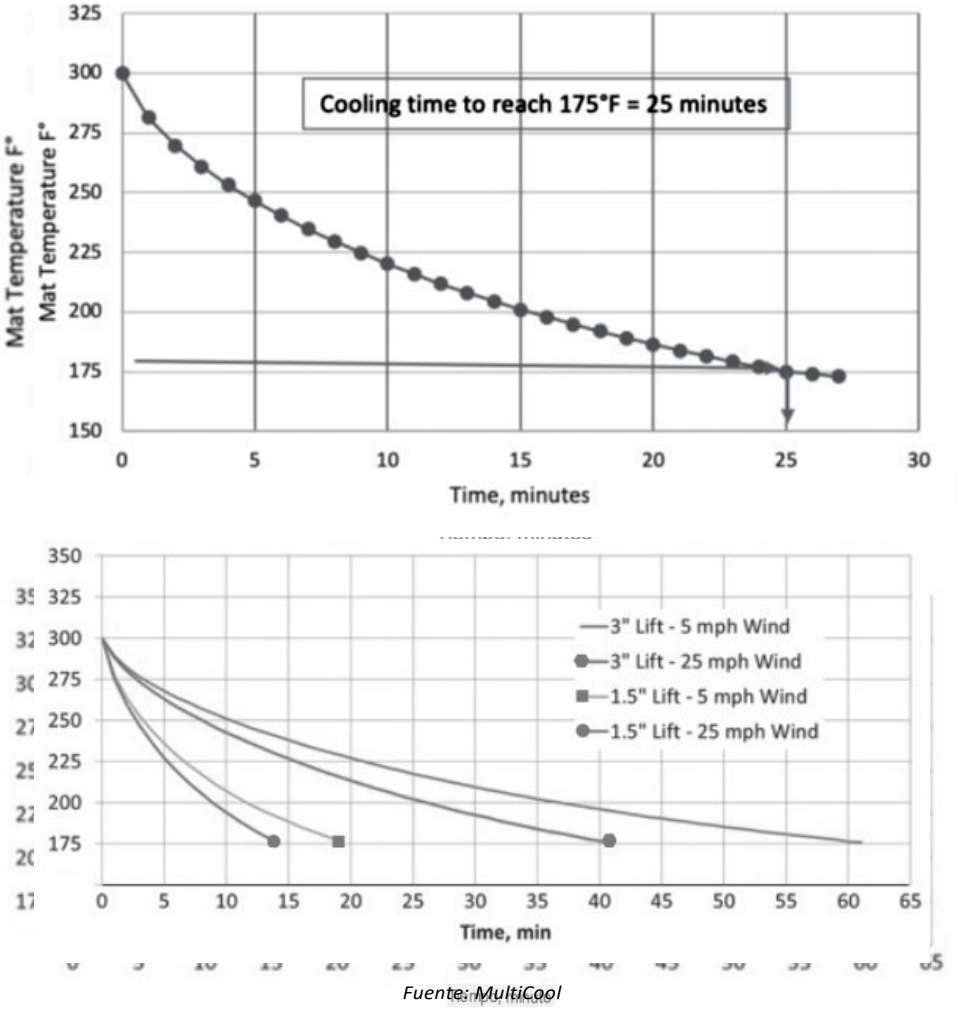
Después de producirse una mezcla asfáltica, esta pierde temperatura constantemente. La pérdida de temperatura es muy lenta cuando se encuentra en un estado voluminoso, como en un silo de almacenamiento, un camión aislado y cubierto con una lona o quizás en un MTV. Cuando se encuentra en una hilera o detrás de la pavimentadora, es menos voluminosa y pierde calor mucho más rápidamente. Los contratistas se ven obligados a trabajar dentro de un intervalo de temperatura específico para lograr la compactación necesaria que favorezca la durabilidad del pavimento.

Es fundamental que los contratistas comprendan cómo los factores ambientales afectarán esta ventana de oportunidad. Entre los factores importantes que entran en juego se incluyen la temperatura del aire, de la superficie y de la mezcla; las condiciones del viento; la nubosidad frente a cielos despejados; y el espesor de la capa de aire ascendente.

Tradicionalmente, los nomogramas estandarizados mostraban una estimación del tiempo disponible para la compactación. Ahora, las calculadoras en línea, el software y las aplicaciones para dispositivos móviles proporcionan estimaciones más precisas y específicas para cada trabajo. Estas herramientas más avanzadas tienen en cuenta el grado de aglutinante, las temperaturas de la mezcla y el espesor compactado de la capa, además de factores específicos del emplazamiento, como

la latitud, la temperatura de la base y otras condiciones ambientales. Las herramientas de software no solo son más precisas, sino que también permiten actualizaciones en tiempo real a medida que cambian las condiciones en el terreno.

Existen programas de software gratuitos, como PaveCool o MultiCool, disponibles en línea y como aplicaciones móviles que predicen el enfriamiento del pavimento asfáltico durante la construcción. Estos programas fáciles de usar estiman cómo las condiciones específicas del sitio afectan el enfriamiento de una capa recién colocada. Los resultados ayudan a los contratistas a planificar sus operaciones de apisonado para alcanzar la densidad deseada de manera más eficiente. Acciones como aumentar la temperatura de la mezcla de la planta, cubrir las unidades de transporte, minimizar la longitud del transporte, acortar las hileras delante de las máquinas de recogida, etc., pueden reducir la velocidad de enfriamiento. La figura 121 muestra gráficos típicos de MultiCool. El gráfico inferior ilustra cómo las capas de 3 pulgadas se enfrían más lentamente que las de 1,5 pulgadas, y cómo los vientos de 25 mph aceleran el enfriamiento en comparación con los de 5 mph.



Fuente: MultiCool

Figura 121. Estimación de la velocidad de enfriamiento de la capa de asfalto durante la compactación

8.4.2 Espesor de la capa

Ver vídeo:
Espesor mínimo

Se debe tener en cuenta el espesor de la capa compactada al planificar un proyecto de pavimentación. Afecta tanto a la la compactabilidad de la capa de asfalto como a la rapidez con la que se enfría. Cuando la capa compactada es demasiado fina en relación con el NMAS de la mezcla, resulta difícil alcanzar la densidad requerida. Las partículas del agregado tienden a romperse, especialmente durante la compactación vibratoria, porque no hay suficiente espacio para la reorientación de las partículas. Una capa demasiado fina y, por lo tanto, un agregado fracturado es un problema muy común.

La recomendación para el espesor mínimo de una sola capa de mezclas asfálticas de granulometría densa es cuatro veces el NMAS para mezclas de granulometría gruesa. Para mezclas de granulometría fina, se recomienda un mínimo de tres veces el NMAS. Las mezclas de granulometría fina tienen una granulometría superior al MDL, mientras que las mezclas de granulometría gruesa tienen una granulometría inferior al MDL. Las directrices históricas sobre el espesor del pavimento, que establecen el doble del «tamaño máximo», son inadecuadas para las granulometrías definidas por el NMAS y pueden dar lugar a un rendimiento deficiente del pavimento.

El siguiente es un ejemplo de una mezcla de grano grueso con un NMAS de 0,5 pulgadas (12,5 mm):

Espesor mínimo aceptable de la capa = 4 × 0,5 pulgadas = 2 pulgadas (50 mm) de espesor compactado.

Del mismo modo, el siguiente es un ejemplo de una mezcla de grano fino con un NMAS de 0,5 pulgadas (12,5 mm):

Espesor mínimo aceptable de la capa = 3 × 0,5 pulgadas = 1,5 pulgadas (37,5 mm) de espesor compactado.

El tiempo disponible para que un contratista logre la densidad también se ve afectado por el espesor de la capa. Las capas gruesas, que pueden definirse como aquellas de más de 3 pulgadas (75 mm), tienen menos material expuesto al aire y a la subsuperficie en relación con su volumen y, por lo tanto, se enfrían más lentamente. Por lo tanto, el contratista tendrá más tiempo para compactar una capa más gruesa que una más fina. Además, por lo general es más fácil alcanzar la densidad requerida en capas más gruesas que en capas más finas. Las capas más gruesas se pueden utilizar cuando se colocan mezclas muy estables que son difíciles de compactar o cuando el pavimentado en condiciones climáticas adversas provoca un enfriamiento rápido. Las capas más gruesas permiten colocar las mezclas a temperaturas más bajas debido a la reducción de la velocidad de enfriamiento. La ejecución de simulaciones en PaveCool o MultiCool proporcionará una imagen clara del efecto del espesor en el enfriamiento durante la construcción, como se ha visto en la figura 121.

8.4.3 Condiciones subyacentes

La subbase o base (u otro material subyacente) debe ser firme y resistente bajo los camiones de transporte y otros equipos de construcción para proporcionar una plataforma sólida para la compactación de las capas de asfalto posteriores. Las subbases o bases que muestren movimiento bajo los camiones o equipos de construcción necesitarán una compactación adicional o algún tipo de trabajo correctivo para superar esta deficiencia antes de la pavimentación. Por lo tanto, es una buena práctica realizar pruebas de rodadura de la subbase

o la base de áridos antes de la pavimentación para identificar cualquier zona que requiera medidas correctivas. Las medidas correctivas pueden consistir en uno de los muchos procesos de estabilización disponibles o en la eliminación completa y sustitución por un material más adecuado. También se puede limitar el tamaño y el peso de los camiones de transporte o, cuando sea posible, desviarlos para evitar el bombeo de los materiales de la subbase y la base.

Una pendiente uniforme es muy ventajosa independientemente del material sobre el que se coloque el asfalto
. Una nivelación no uniforme dará lugar a un espesor variable en la capa de asfalto. Además, los puntos altos de la superficie irregular tienden a hacer que los rodillos de ruedas de acero se salten los surcos y otros puntos bajos. Esto dará lugar a densidades variables y nivelaciones desiguales en esas capas. Con el tiempo, la falta de uniformidad con la que se pavimentó se reflejará en la superficie, comprometiendo su rendimiento.

Una buena práctica consiste en corregir la falta de uniformidad antes de pavimentar. Algunas de las opciones más comunes incluyen nivelar adecuadamente la base o la subbase, fresar la superficie existente o colocar una capa niveladora de asfalto si no es posible fresar. Todas estas opciones tienen como objetivo lograr una superficie con un grado uniforme.

8.5 VARIABLES DE COMPACTACIÓN BAJO EL CONTROL DEL OPERADOR

El operador puede controlar varias de las variables principales de compactación durante el proceso de laminación, incluyendo la velocidad del rodillo, el número de pasadas del rodillo, la zona de laminación y el patrón de laminado. En el caso de los rodillos vibratorios y oscilantes, la dirección de desplazamiento y el modo de funcionamiento también están bajo el control del operador. Cada uno de estos factores afecta al nivel de densidad que se consigue con el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla.

Ver vídeo:
Operaciones del rodillo

8.5.1 Pasadas y coberturas del rodillo

Cada punto de una alfombra recién colocada necesita que los rodillos pasen por encima de él un determinado número de veces. Se entiende por pasada un único movimiento de un rodillo sobre cualquier punto. Por lo tanto, un rodillo que se mueva hacia delante sobre un punto (una pasada) y luego vuelva sobre ese punto cuando el rodillo invierta su sentido de marcha (segunda pasada) habrá realizado dos pasadas.

Las coberturas son el número de pistas necesarias desde un lado de una capa de asfalto hasta el otro para cubrir la capa una vez. Esto se calcula determinando primero el ancho efectivo del rodillo:

$$EffectiveRoller\ WWidth = Roller\ WWidth - Overlap$$

Ancho de rodillo efectivo = Ancho de rodillo-Superposición

El solapamiento es la cantidad del tambor que sobresale de las pistas anteriores. Normalmente es de entre 4 y 6 pulgadas.

Por lo tanto, la ecuación para el número de pistas para una cobertura adecuada será:

$$\text{Cobertura} = \frac{\text{Pavimentación WWidth}}{\text{Ancho de banda efectivo}}$$

A menos que la ecuación de cobertura dé como resultado un número entero, la respuesta siempre se redondeará al número entero superior.

8.5.2 Velocidad del rodillo

Establecer y mantener la velocidad de los rodillos es fundamental para obtener una compactación uniforme. Cuanto más rápido pasa un rodillo por un punto concreto, menos tiempo permanece el peso del rodillo sobre ese punto. Esto, a su vez, significa que se aplica menos esfuerzo de compactación a la mezcla. A medida que aumenta la velocidad del rodillo, disminuye la densidad obtenida con cada pasada del rodillo. La velocidad del rodillo seleccionada depende de una combinación de factores: la velocidad de la pavimentadora, el espesor de la capa y la posición del equipo en el tren de rodillos. La velocidad objetivo del rodillo siempre debe ser la más baja que permita alcanzar la densidad y que la pavimentadora mantenga un funcionamiento continuo y constante.

velocidad. En general, la velocidad de los rodillos no superarán la velocidad de caminata para alcanzar estos objetivos.

A medida que aumenta la velocidad del rodillo, disminuye la densidad obtenida con cada pasada del rodillo.

Una vez establecida, la velocidad del rodillo no debe cambiar a menos que no se cumplan los requisitos de densidad. Si esto ocurre, el rodillo tendrá que reducir la velocidad o será necesario añadir pasadas adicionales. Se debe revisar la velocidad objetivo de la pavimentadora si se produce un cambio en la velocidad del rodillo o en el número de pasadas. La pavimentadora y los rodillos siempre deben estar coordinados y equilibrados entre sí.

Una vez seleccionada una velocidad del rodillo que se equilibre con la velocidad de la pavimentadora, el rodillo debe resistirse a acelerar si la pavimentadora se aleja. Acelerar puede alcanzar a la pavimentadora, pero se perderá la densidad crítica debido a la mayor velocidad del rodillo.

Cuando se utilizan rodillos vibratorios, la separación entre impactos viene determinada por la frecuencia, VPM o hercios, y la velocidad del rodillo, en pies o metros por minuto. El espaciamiento de impacto recomendado es de 10 a 14 IPF (31 a 47 impactos por metro). Si se cae por debajo de este rango, se producirá un efecto de lavado, lo que perjudicará la calidad de la conducción. Cuando el espaciamiento de impacto es mayor que esto, la calidad de la conducción también puede verse afectada por la formación de crestas en la capa nueva.

La determinación del IPF o metro se acompaña de la medición de la velocidad de avance en pies o metros por minuto y dividiéndola por la frecuencia. Se recomienda a los equipos de pavimentación que predeterminen el número de IPF que desean obtener y que luego calculen la velocidad de avance que producirá este nivel utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{Frequency\ of\ Vibration\ \left(\frac{Vibrations}{Minute}\right)}{Desired\ Impacts\ per\ Length} = Roller\ Speed\ \left(\frac{Length}{Minute}\right)$$

Por ejemplo, se busca un objetivo de 12 IPF con un rodillo cuya frecuencia se establece en 4200 VPM. La velocidad adecuada del rodillo sería:

$$\frac{4200\ \left(\frac{Vibrations}{Minute}\right)}{12\ Impacts\ per\ Foot} = 350\left(\frac{Feet}{Minute}\right) \Longrightarrow 4.0\ mph$$

Del mismo modo, si el objetivo fuera 36 impactos por metro con la misma configuración del rodillo, la velocidad sería:

$$\frac{4200\ \left(\frac{Vibrations}{Minute}\right)}{36\ Impacts\ per\ Meter} = 117\left(\frac{Meters}{Minute}\right) \Longrightarrow 7.0\ km/hr$$

Tenga en cuenta que los rodillos no solo se desplazan hacia adelante, sino que también necesitan invertir su dirección. En ocasiones, es posible que tengan que rellenar sus depósitos de agua para el sistema de pulverización que minimiza la recogida de asfalto fresco por parte del tambor durante un turno de trabajo. Estos factores deben tenerse en cuenta. Por estas razones, habrá que aplicar un «factor de eficiencia». El rango típico para un factor de eficiencia es del 75 al 85 por ciento (0,75 a 0,85). Si no es necesario rellenar el agua, entonces puede llegar hasta el 90 por ciento (0,90). La ecuación para hacer este cálculo es:

Factor de Eficiencia X de la Velocidad del Rodillo = EfectivoVelocidad del Rodillo

La velocidad efectiva de compactación del rodillo se calcula para este rodillo de la siguiente manera. El rodillo tiene 84 pulgadas de ancho y el solapamiento entre las orugas es de 6 pulgadas. El ancho de pavimentación es de 14 pies y el factor de eficiencia del rodillo es del 80%.

Aplique el factor de eficiencia del rodillo de la siguiente manera para determinar la velocidad efectiva del rodillo:

Factor de Eficiencia X de la Velocidad del Rodillo = EfectivoVelocidad del Rodillo

$$350\left(\frac{ft}{min}\right)\ X\ 0.80 = 280\ \left(\frac{ft}{min}\right) = 3.2\ mph$$

$$117\left(\frac{meters}{min}\right)\ X\ 0.80 = 93.6\ \left(\frac{meters}{min}\right) = 5.6\ km/hr$$

Determine el número de pasadas del rodillo para cubrir el ancho que se está tirando:

$$\frac{PavingWWidth(ft)}{EffectiveRoller\ WWidth\ (ft)} = Number\ of\ Tracks\ for\ Coverage$$

$$EffectiveRoller\ WWidth\ (ft) = Roller\ WWidth\ (ft) - Overlap\ (ft)$$

$$7\ (ft) - 0{,}5\ (ft) = 6{,}5\ (ft)$$

$$\frac{14\ (ft)}{6{,}5\ (ft)} = 2{,}15 Tracks\ for\ Coverage$$

La respuesta siempre se redondea al alza, por lo que en este ejemplo se necesitan tres pasadas para cubrir toda la superficie.

Por lo tanto, para el proyecto descrito anteriormente, compactado con las especificaciones del rodillo descritas, el rodillo debe funcionar a 3,2 mph en tres pasadas para obtener una cobertura completa.

Para verificar esta información con respecto a la velocidad de la pavimentadora, aplique la siguiente ecuación:

$$\frac{Effective\ Roller\ Speed}{Total\ number\ of\ Passes} = Paver\ Speed$$

El número total de pasadas será el número de pasadas para una cobertura completa (tres en este ejemplo) multiplicado por el número de pasadas establecido con la tira de prueba. Suponiendo que las pasadas de las tiras de prueba sean cinco en este ejemplo, el número total de pasadas será 15 (3×5).

Por lo tanto, en este ejemplo, la velocidad de la pavimentadora será:

$$\frac{280\ \left(\frac{ft}{min}\right)}{15\ Passes} = 18.7\ \left(\frac{ft}{min}\right) Paver\ Speed$$

Lo que esto significa es que la velocidad máxima a la que podría funcionar la pavimentadora, si se controla porcompactación, es de 18,7 pies/min. Si la franja de prueba mostrara que tres pasadas lograrían la compactación necesaria, entonces el cálculo mostraría una velocidad de pavimentación de 31,1 pies/min.

Cabe señalar que la producción de la planta (analizada en el capítulo 4) o el transporte por camión (analizado en capítulo 6) podrían controlar el equilibrio entre producción, entrega, colocación y compactación.

8.5.3 Zona de rodadura

La «zona de rodadura» es el rango de temperatura en el que se lleva a cabo la compactación. La compactación debe realizarse mientras la viscosidad del ligante asfáltico de la mezcla y la rigidez de la mezcla sean lo suficientemente bajas como para permitir la reorientación de las partículas del agregado.

bajo la acción de los rodillos. En otras palabras, la estera debe seguir estando lo suficientemente caliente como para que la compactación sea eficaz. Como se ha comentado en el apartado 8.4.1.3, es necesario alcanzar la densidad antes de que se alcance la temperatura de cesación, lo que detiene de forma efectiva la densificación adicional.

Para obtener la densidad requerida lo más rápidamente posible, la compactación inicial debe realizarse directamente detrás de la máquina extendidora. Si la mezcla asfáltica es lo suficientemente estable, el laminado de descomposición puede realizarse muy cerca de la pavimentadora mientras la temperatura de la capa aún es alta. Se obtiene más densidad con una sola pasada cuando la temperatura de la mezcla es más alta que después de que se haya enfriado.

A veces, cuando se coloca una mezcla blanda, se retrasa el compactado inicial para evitar que los rodillos empujen o comprueben excesivamente la mezcla. Dependiendo de las características de la mezcla, se puede lograr la densidad requerida si se aplica la combinación adecuada de rodillos y esfuerzo de compactación. Sin embargo, en aquellos casos en los que la mezcla es tan blanda que el apisonado debe retrasarse hasta el punto de que no se puede alcanzar el nivel de densidad deseado, deben probarse otras soluciones. Cuando se encuentra una mezcla blanda, debe determinarse la causa de la blandura y realizar cambios en la producción de la mezcla y en la operación de pavimentación para garantizar una densidad adecuada.

La compactación de mezclas blandas se trata más adelante en este capítulo.

8.5.4 Operaciones con rodillos

El uso inadecuado de los rodillos resultará, en el mejor de los casos, frustrante y, en el peor, perjudicial para el material recién colocado. Por lo tanto, es imprescindible que los operadores de rodillos reciban la formación adecuada para que compacten la mezcla hasta alcanzar la densidad adecuada de forma eficaz y sin dañarla.

La compactación debe realizarse mientras la estera se encuentra en la zona de apisonado. Los rodillos permanecerán con la pavimentadora y lograrán la densidad si se mantiene la velocidad establecida del rodillo mientras se realizan las pasadas y coberturas necesarias. La zona de apisonado se divide generalmente en tres fases: apisonado inicial, apisonado intermedio y apisonado final. Cada una de ellas se analizará más adelante.

Aunque la mayoría de los contratistas han desarrollado patrones de rodillos que les funcionan bien de forma constante, es necesario verificar y modificar este patrón estándar. Cada mezcla se comportará de manera diferente, por lo que a menudo será necesario ajustar el número y los tipos de rodillos necesarios, el número de pasadas y las temperaturas correspondientes de la mezcla, así como la configuración de los rodillos. Las mezclas varían en su rigidez o blandura inherentes con diferentes combinaciones de ligantes y áridos. La junta longitudinal puede resultar especialmente difícil de compactar para el contratista. El siguiente capítulo está dedicado a la junta debido a las dificultades que plantea.

El arranque y la parada del rodillo deben realizarse gradualmente. Arrancar o detener un rodillo demasiado rápido puede rasgar la estera nueva. Las paradas con rodillos de tambor de acero deben realizarse en ángulo para evitar la formación de un bulto que permanecerá incluso después de completar todas las operaciones de laminación. Los operadores de rodillos nunca deben girar el rodillo si está detenido, ya que esto rasgará la estera. Además, los rodillos vibratorios u oscilatorios deberán tener los potenciadores de compactación se desactivan al detenerse y no se vuelven a activar hasta que el rodillo ha acelerado desde su parada. Los rodillos modernos lo hacen automáticamente.

Cada mezcla se comportará de manera diferente, por lo que a menudo será necesario ajustar el número y los tipos de rodillos necesarios, el número de pasadas y las temperaturas correspondientes de la mezcla, así como la configuración de los rodillos.

El operador debe estar atento a las grietas de control. Estas grietas suelen ser finas y muy superficiales. Esto se trata con más detalle en el capítulo 12.

8.6 DETERMINACIÓN DEL PATRÓN DE APLASTAMIENTO

Ver vídeo: *Operaciones con rodillos*

El patrón de rodillo es el número de pasadas y coberturas que los rodillos respectivos buscan en cada una de las fases de densificación. Para el operador del rodillo, mantener el patrón durante toda la operación de pavimentación supone un reto considerable. Se ha demostrado que el uso de tecnología avanzada, como el control de inteligencia artificial (IC), ayuda enormemente en esta tarea.

8.6.1 Cálculo del patrón de apisonado

El número y el tipo de rodillos necesarios en un proyecto pueden variar. Independientemente del número de rodillos, la secuencia básica de laminación para un proyecto típico se puede dividir en las tres fases siguientes. Preferiblemente, debe haber al menos un rodillo para cada una de estas fases.

- Rodadura de descomposición (inicial): la primera secuencia de pasadas realizadas por el rodillo o rodillos designados para la descomposición sobre la capa recién colocada.
- Laminado intermedio: todas las pasadas posteriores del rodillo o rodillos para obtener la densidad requerida antes de que la mezcla se enfríe hasta la temperatura de cesación.
- Laminado de acabado: laminado realizado únicamente para mejorar el aspecto de la superficie mientras la mezcla aún está lo suficientemente caliente como para permitir la eliminación de cualquier marca del rodillo. Por lo general, no se espera un aumento de la densidad debido al laminado de acabado.

Se debe seguir un patrón de rodillo consistente para garantizar una capa con la densidad, forma y suavidad especificadas. El patrón de rodillo determina qué partes de la estera se enrollan primero y qué parte se enrolla al final. Los patrones de rodillo dependerán de muchos factores, incluyendo el ancho de pavimentación, el ancho del rodillo, el número de pasadas necesarias para obtener la densidad especificada y las características específicas de las juntas longitudinales (confinadas frente a no confinadas), como se describe en el siguiente capítulo.

A medida que cambian las condiciones del proyecto, el contratista debe estar dispuesto a modificar la operación de compactación para garantizar que se obtenga la densidad objetivo. Las franjas de prueba tienen por objeto evaluar toda la operación de pavimentación, desde la producción hasta la compactación. Esto permite al contratista demostrar su capacidad para cumplir con las especificaciones antes de entrar en plena producción.

8.6.1.1 Rodillo de descomposición

El objetivo del laminado de descomposición es alcanzar un alto porcentaje de la densidad objetivo mientras la estera se encuentra a su temperatura más alta. Esto se logra utilizando rodillos de descomposición con las fuerzas de compactación más altas que sean adecuadas para el tipo de mezcla asfáltica y el espesor de la capa que se utilicen en el proyecto.

Es importante comenzar la operación de compactación con rodillo en el lado bajo de la capa (normalmente el exterior del carril que se está pavimentando) y avanzar hacia el lado alto. El motivo es que las mezclas calientes tienden a migrar hacia el lado bajo de la capa durante la compactación. Si se comienza a compactar con rodillo en el lado alto, la migración es mucho más pronunciada que si se comienza en el lado bajo.

Cuando la mezcla asfáltica es relativamente fácil de compactar, puede ser suficiente con un solo rodillo de descomposición. En situaciones en las que las altas tasas de producción exigen una alta velocidad de la pavimentadora o en las que la mezcla es difícil de compactar, se suelen utilizar dos o más rodillos de descomposición. La figura 122 muestra dos rodillos vibratorios trabajando juntos para acelerar el proceso de compactación y aumentar el esfuerzo de compactación mientras la capa se encuentra a la temperatura óptima.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 122. Compactación con varios rodillos vibratorios

8.6.1.2 *Compactación intermedia*

El compactado intermedio debe realizarse lo más pronto posible después del compactado inicial, mientras la mezcla asfáltica aún se encuentra muy por encima de la temperatura de cesación. El compactado intermedio debe ser continuo hasta que toda la mezcla haya sido completamente compactada. También se pueden utilizar varios rodillos trabajando juntos para el compactado intermedio, especialmente en proyectos de alta producción donde las velocidades de la pavimentadora son elevadas. En ocasiones, esta fase se puede omitir si el compactado inicial ha logrado la densidad necesaria.

8.6.1.3 *Compactación final*

El apisonado de acabado es la fase final del proceso de compactación, que se realiza únicamente para eliminar las marcas dejadas por los rodillos de descomposición e intermedios, de modo que la superficie tenga un buen aspecto y se pueda circular por ella con suavidad. Por lo tanto, el apisonado de acabado se realiza a temperaturas relativamente bajas, y mientras el material aún está lo suficientemente caliente como para eliminar las marcas de los rodillos. Los rodillos vibratorios deben funcionar en modo estático cuando se utilizan para el apisonado de acabado, ya que las vibraciones pueden dañar la capa fría.

8.6.1.4 *Compactación de mezclas rígidas*

Las mezclas asfálticas que están bien diseñadas serán razonablemente rígidas y estables, y requerirán un esfuerzo de compactación considerable para alcanzar el grado de densidad requerido. Este tipo de mezcla soportará el peso del equipo de compactación directamente detrás de la pavimentadora. Si la mezcla se coloca a una temperatura de 275 °F (135 °C) o superior, los rodillos normalmente podrán compactarla adecuadamente antes de que se enfríe hasta alcanzar la temperatura de cesación.

Lo más habitual es utilizar tres rodillos: un rodillo de descomposición, un rodillo intermedio y un rodillo de acabado. Para el laminado de descomposición, como se ha comentado anteriormente, se suele utilizar un rodillo vibratorio de tambor de acero. Para el laminado intermedio, se suele emplear un rodillo neumático, aunque a veces se utiliza un segundo rodillo vibratorio u oscilatorio. El laminado de acabado se realiza normalmente con un rodillo estático de rueda de acero o un rodillo vibratorio de tambor de acero utilizado en modo estático.

Los rodillos de descomposición y los rodillos intermedios deben permanecer cerca de la pavimentadora. Si la mezcla es estable, no se producirá una ola de proa delante del tambor del rodillo vibratorio y la mezcla no presentará grietas ni fisuras. Con una mezcla relativamente rígida, el rodillo de acabado también puede estar cerca de la pavimentadora, ya que habrá que eliminar las marcas mínimas dejadas por los rodillos de descomposición y los rodillos intermedios.

Debido a la estabilidad interna y la resistencia de una mezcla rígida, es posible que se requiera un mayor esfuerzo de compactación para obtener un nivel determinado de densidad (porcentaje de TMD), pero la mezcla no se desplazará hacia afuera bajo el equipo de compactación durante el proceso de laminación. Las mezclas rígidas de este tipo se encuentran con mayor frecuencia en proyectos de aeródromos.

Para mezclas muy rígidas o cuando se desea un alto grado de densidad, se puede utilizar un rodillo neumático para el laminado de descomposición. Para el laminado intermedio, se debe

seguir directamente detrás del rodillo neumático, y el laminado de acabado debe realizarse con un rodillo estático de ruedas de acero.

8.6.2 Compactación de mezclas blandas

Una mezcla blanda es inestable internamente, tiende a desplazarse lateralmente y a empujar mientras se compacta. La estabilidad interna de la mezcla depende de la viscosidad del ligante asfáltico, la temperatura de la capa y la gradación y forma del agregado. La blandura inducida por la temperatura suele ser de dos tipos: sensibilidad a alta temperatura o sensibilidad a temperatura media.

8.6.2.1 Sensibilidad a alta temperatura

A altas temperaturas, algunas mezclas pueden no ser lo suficientemente estables como para soportar las cargas de los rodillos sin desplazarse lateralmente. Dado que esto ocurre a altas temperaturas, lo más habitual es que se produzca en los rodillos de descomposición cuando están cerca de la pavimentadora. Las capas que presentan sensibilidad a altas temperaturas suelen compactarse simplemente esperando a que se enfríen hasta que la viscosidad del asfalto sea lo suficientemente alta como para soportar las cargas de los rodillos. Por lo general, esto es suficiente para resolver el problema, pero en raras ocasiones el período de espera puede ser tan largo que la mezcla no se puede compactar adecuadamente antes de alcanzar la temperatura de cesación. Se ha demostrado que los rodillos oscilantes ofrecen un aumento de la densidad a temperaturas más bajas que los rodillos vibratorios. Si ninguna combinación de rodillos logra alcanzar la densidad deseada, puede ser necesario un nuevo diseño de la mezcla. Las mezclas que muestran sensibilidad a las altas temperaturas suelen ser susceptibles de sufrir baches más adelante.

8.6.2.2 Sensibilidad a temperaturas medias

Algunas mezclas son estables a altas temperaturas, pero no pueden soportar cargas de rodillos sin desplazarse lateralmente a temperaturas medias (normalmente entre 240 °F [115 °C] y 190 °F [90 °C]). La «zona sensible» es un término que se asocia generalmente con esta sensibilidad a temperaturas medias. Existen varias teorías sobre el mecanismo que causa la zona blanda, pero podría decirse que la más común es que, cuando se coloca la mezcla, su temperatura es relativamente alta y uniforme en toda su extensión. Durante la compactación, las capas superior e inferior de la estera se enfrían más rápidamente. La capa intermedia permanece más caliente y, por lo tanto, es menos rígida que la parte superior e inferior de la estera. Cuando se enrolla en estas condiciones, un rodillo con ruedas de acero tiende a empujar la parte superior de la estera lateralmente más allá de la parte inferior, utilizando la parte media como capa lubricante. Además, la mezcla sigue siendo lo suficientemente fluida en la parte media de la estera como para hacer que el tambor se hunda en ella y crear una pequeña onda en la parte delantera.

Se pueden utilizar varias técnicas diferentes para compactar una capa que presenta sensibilidad a temperaturas medias. En primer lugar, si se realiza de forma rápida y eficaz, el laminado de descomposición puede completarse antes de que la capa alcance la zona sensible. A continuación, se puede utilizar un rodillo neumático durante la fase intermedia. Por último, se puede utilizar un rodillo estático de acero para el laminado final si se mantiene alejado de la capa hasta que su temperatura haya descendido por debajo de la zona sensible.

8.6.2.3 Causas de las mezclas sensibles

Las mezclas sensibles también pueden deberse a cualquiera de estos factores adicionales, o a una combinación de ellos:

- **Contenido excesivo de humedad**: el exceso de humedad puede provenir de un agregado insuficientemente seco o, en el caso de una capa de recubrimiento, de la humedad presente en la superficie del pavimento existente. Esta humedad disminuye la resistencia interna de la mezcla al aumentar el contenido líquido de la misma. A medida que la humedad se convierte en vapor, hace que el asfalto líquido caliente forme espuma, lo que provoca su expansión y separa las partículas del agregado.
- **Exceso de contenido de ligante asfáltico**: a las temperaturas de pavimentación, los ligantes asfálticos actúan como lubricantes durante la compactación. Las mezclas con alto contenido de asfalto se compactan fácilmente, pero pueden desplazarse bajo la carga de los rodillos.
- **Partículas de áridos redondeadas**: las partículas redondeadas, que se encuentran en arenas y gravas, tienden a deslizarse unas sobre otras durante la compactación, lo que provoca distorsiones y desplazamientos durante el laminado.
- **Exceso de áridos finos de tamaño medio (entre los tamices de 0,60 y 0,30 mm [n.º 30 y n.º 50])**: esto puede ser el resultado de cantidades excesivas de arenas naturales incorporadas en el diseño de la mezcla o durante la producción de la misma.
- **Finos insuficientes (agregados que pasan por el tamiz de 0,075 mm [n.º 200])**: durante la producción, el polvo y los agregados extremadamente finos se mezclan con el ligante asfáltico y proporcionan cierta rigidez.
- **Mala adherencia al pavimento existente (para recubrimientos)**: si un recubrimiento se adhiere mal a la superficie existente, puede actuar como un elemento blando, ya que se desplaza lateralmente en lugar de compactarse bajo los rodillos. Una mala adherencia puede deberse a no utilizar una capa de adherencia suficiente o a no aplicar las mejores prácticas para su aplicación.
- **Temperatura excesiva de la mezcla**: a temperaturas excesivamente altas, es posible que el ligante asfáltico no sea lo suficientemente viscoso como para soportar la compactación. En algunos casos, la superficie se ha enfriado, pero el centro de la mezcla aún puede estar demasiado caliente para soportar los rodillos. Por lo general, las mezclas deben colocarse a una temperatura de compactación adecuada para que el laminado pueda comenzar inmediatamente detrás de la pavimentadora.
- **Técnicas de compactación:** unas técnicas de compactación deficientes pueden agravar los problemas de sensibilidad. Las paradas y arranques bruscos con un rodillo de ruedas de acero generarán fuerzas excesivas que favorecerán el desplazamiento lateral. Utilizar un rodillo vibratorio en modo estático durante el laminado de descomposición y eliminar los arranques y paradas bruscos reducirá la posibilidad de movimiento lateral de la mezcla. Por lo general, las mezclas que parecen blandas bajo un rodillo de ruedas de acero parecerán menos blandas bajo un rodillo de neumáticos; por lo tanto, se debe considerar el uso de un rodillo neumático para la compactación de grietas.

8.7 LISTAS DE COMPROBACIÓN DE RODILLOS

8.7.1 Rodillos con ruedas de acero

- ❑ ¿Cumple el rodillo con las especificaciones del proyecto?
- ❑ ¿Las ruedas de acero están lisas, limpias y en buen estado (sin picaduras ni astillas)?
- ❑ ¿El rodillo tiene lastre, si es una opción?
- ❑ ¿Está lleno el depósito del agente desmoldeante?
- ❑ ¿Funciona correctamente el sistema de pulverización de los tambores?
- ❑ ¿Están los rascadores en buen estado, limpios y ajustados para funcionar correctamente?
- ❑ Si es vibratorio, ¿los ajustes iniciales de frecuencia y amplitud son adecuados para el espesor de la capa?

8.7.2 Rodillo neumático

- ❑ ¿Cumple el rodillo con las especificaciones del proyecto?
- ❑ ¿Los neumáticos están lisos, limpios y en buen estado (sin grietas ni desperfectos)?
- ❑ ¿Están todos los neumáticos inflados de forma adecuada y uniforme?
- ❑ ¿Está lleno el depósito del agente desmoldeante?
- ❑ ¿Funciona correctamente el sistema de pulverización de los neumáticos?
- ❑ ¿Las alfombrillas rascadoras están en buen estado, limpias y configuradas para funcionar correctamente?
- ❑ ¿El rodillo tiene lastre, si es una opción?
- ❑ ¿Están instaladas las faldillas alrededor de los neumáticos para retener el calor?

9. Construcción conjunta

9.1 INTRODUCCIÓN

Durante la construcción de pavimentos asfálticos, se encuentran dos tipos de juntas. La primera es una junta transversal, que se construye cada vez que se interrumpe la operación de pavimentación durante un período de tiempo, que puede variar entre 15 minutos y varias semanas o más. El segundo es unajunta longitudinal (LJ), que se construye cuando se construye un carril adyacente a un carril previamente colocado de mezcla (véase la figura 123). Ambos tipos de juntas son fundamentales para el rendimiento; las juntas transversales tienen unimpacto significativo en la suavidad, mientras que las LJ tienen un gran impacto en la durabilidad a largo plazo.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 123. Juntas longitudinales en la pista de un aeródromo

El deterioro de las juntas comienza cuando el aire, el agua y los contaminantes se introducen en la junta, ya sea por segregación, mala densidad o porque las dos capas no se adhieren correctamente. Dado que la distancia lineal de las juntas longitudinales es mucho mayor que la distancia lineal de las juntas transversales, tanto en carreteras como en aeródromos, el debate sobre la durabilidad y el deterioro de las juntas se centra generalmente en las juntas longitudinales.

Los problemas típicos cerca de la junta longitudinal son el agrietamiento y el deshilachado (véase la figura 124). A medida que la junta se deteriora, requerirá un mantenimiento adicional, como el sellado de juntas, el parcheo o el repavimentado prematuro. Dado que normalmente hay numerosas LJ en un

Las juntas transversales tienen un impacto significativo en la suavidad, mientras que las juntas longitudinales (LJ) tienen un gran impacto en la durabilidad a largo plazo.

pavimento, su rendimiento es vital para el rendimiento general de un proyecto. El rendimiento insatisfactorio de las LJ ha sido a menudo el eslabón más débil en un pavimento asfáltico que, por lo demás, es duradero.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 124. Deterioro prematuro de las juntas longitudinales

En los aeródromos, las grietas y el desprendimiento de material alrededor de las juntas longitudinales provocan la pérdida de material de la superficie del pavimento y constituyen una fuente importante de objetos extraños (FOD) que pueden ser aspirados y dañar los motores de las aeronaves, tal y como se explica en la sección 1.2.

9.1.1 Resumen del capítulo

Las técnicas para construir cada tipo de junta se tratan en este capítulo y se han omitido intencionadamente en los dos capítulos anteriores sobre colocación y compactación de la mezcla para consolidar aquí el debate sobre las juntas.

Las juntas transversales, también denominadas juntas de construcción, se tratan en primer lugar, seguidas de una extensa sección sobre las juntas lineales. El pavimentado escalonado, un método que reduce el número de juntas lineales en frío, tiene su propia sección. La última sección menciona algunos nuevos tratamientos y métodos para las juntas lineales. Las consideraciones y técnicas más habituales en el pavimentado de aeródromos, como el recorte de las juntas lineales, se integran en las secciones correspondientes de este capítulo.

9.1.2 Terminología

Al hablar tanto de juntas transversales como de LJ, es necesario definir los siguientes términos (véase también la figura 125):

Lado frío o lado no confinado: el primer lado de la junta que se colocó y se dejó enfriar antes de colocar el otro lado de la junta. Este lado ha tenido la oportunidad de enfriarse después de la compactación y, por lo tanto, se denomina lado frío de la junta. En el caso de las juntas lineales, también es

denominada «franja fría». Dado que la estera se colocó y compactó sin ningún tipo de confinamiento lateral bajo el rodillo, también se la denomina «lado no confinado de la junta». La falta de confinamiento dificulta la densificación bajo el rodillo y es la razón por la que las especificaciones para pavimentos de aeródromos exigen recortar y retirar varios centímetros de este material de menor densidad.

Lado caliente o lado confinado: el segundo lado de la junta que se colocó. Este lado se coloca y compacta en caliente, junto al lado frío, por lo que se denomina lado caliente de la junta. En el caso de las LJ, también se denomina carril caliente. Dado que la estera se coloca junto a otra que ya se ha enfriado y endurecido, la estera situada debajo del rodillo queda confinada lateralmente. Debido al confinamiento, normalmente es más fácil conseguir densidad en este lado de la junta. Uno de los mayores problemas en el lado caliente de la junta es no garantizar que se coloque un espesor suficiente de material (25 % de enrollamiento) para permitir que se obtenga densidad a medida que el material se enrolla, incluso con el lado frío. Este tema se trata en detalle en la sección 9.3.3.2.

Junta caliente frente a junta fría: el término «junta caliente» se refiere a las circunstancias en las que se colocan dos carriles de mezcla y ambos carriles permanecen lo suficientemente calientes como para permitir una compactación adecuada a ambos lados de la junta. Un límite de temperatura típico en las especificaciones de los aeródromos para distinguir entre una junta caliente y una junta fría es de 175 °F, lo que significa que, si la temperatura de la mezcla desciende por debajo de 175 °F, debe tratarse como una junta fría debido a la dificultad para alcanzar una densidad adecuada. La pavimentación escalonada es una técnica que crea juntas calientes en lugar de juntas frías.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 125. Términos comunes para juntas transversales y longitudinales

9.2 JUNTAS TRANSVERSALES/DE CONSTRUCCIÓN

Ver vídeo:
Construcción de juntas transversales

9.2.1 Al final de la operación de pavimentación

Cuando se suspende una operación de pavimentación en medio de un proyecto, ya sea durante la noche o durante un período prolongado, se requiere una junta transversal de construcción.

En el caso de los aeródromos, es conveniente que el pavimentado al final del día termine en la zona que se está pavimentando, como el extremo de una pista de aterrizaje, para reducir el número de juntas transversales, lo que tenderá a aumentar la suavidad y minimizar los objetos extraños (FOD).

Cuando se requiere una junta transversal, es importante que la pavimentadora se utilice de forma normal hasta el punto en el que se ubicará la junta transversal. La cabeza del material delante de

la regla debe permanecer constante hasta la ubicación de la junta, de modo que las fuerzas que actúan sobre la regla sean constantes y se mantenga un ángulo de ataque uniforme.

En el caso de los aeródromos, es conveniente que el pavimentado al final del día termine en la zona que se está pavimentando, como el final de una pista, para reducir el número de juntas transversales.

Una buena práctica consiste en ubicar la junta transversal en un punto en el que la altura del material delante de la regla sea normal. No es recomendable agotar la mezcla de la tolva antes de llegar al lugar donde se va a construir la junta transversal. Cuando se hace esto, se reduce la cantidad de mezcla transportada por los sinfines, al igual que la altura del material delante de la regla de la pavimentadora, lo que provoca una caída del ángulo de la regla. El espesor de la capa disminuirá gradualmente hasta llegar a la ubicación de la junta. Esto dará lugar a un punto bajo en la nueva superficie del pavimento.

Cuando se reanuda la pavimentación, se necesita una cara casi vertical en el lado frío de la junta. La creación de esa cara vertical, independientemente de si la junta se abrió temporalmente al tráfico o no, se analiza en la siguiente sección.

Si se abre al tráfico, la junta transversal debe proporcionar una transición segura y suave para los vehículos que bajan desde el nivel de la nueva superficie hasta la superficie existente. La forma más fácil de hacerlo es construir una cuña temporal de material para que el tráfico descienda hasta la superficie subyacente. Esta cuña se retira antes de reanudar las operaciones de pavimentación.

9.2.1.1 Rampa temporal para el tráfico

Hay tres métodos que los contratistas de pavimentación pueden emplear para construir correctamente la cuña de sacrificio:

1. Detenga la pavimentadora y levante la regla por encima de la cabeza del material en la zona del sinfín. A continuación, separe el exceso de material excavando una zanja transversal en la mezcla fresca en el lado aguas abajo de la junta. Empuje hacia atrás la cara de la línea de la junta con una paleta o un rastrillo para crear un borde vertical afilado en el lado de la junta que permanece en su sitio. Utilice un material antiadherente (plástico o papel Kraft) para revestir la parte inferior de la zona de la cuña y cubrir la cara vertical (véase la figura 126). Después de revestir la zona con un antiadherente, mueva el exceso de mezcla sobre el antiadherente y rastrille hasta formar una cuña. A continuación, se compacta toda la zona.
2. En una variante del método anterior, inserte un bloque de madera o un mamparo del mismo grosor y anchura que la estera compactada después de revestir la zona aguas abajo de la junta lateral con el separador de adherencia. Este bloque permanecerá en su sitio para proporcionar una cara vertical verdadera en el lado frío de la junta y facilitar la retirada de la cuña de material sacrificial cuando se reanude la pavimentación. Se debe tener cuidado para evitar que el mamparo se desplace si se abre al tráfico. La exposición prolongada al tráfico puede requerir la fijación o clavado de los bloques o mamparos.

3. Si la cuña temporal solo va a ser utilizada por el tráfico durante un breve periodo de tiempo (por ejemplo, durante la noche), se puede eliminar la aplicación de la capa de adherencia debajo de la cuña, lo que facilitará enormemente su retirada. Después de seleccionar y marcar la ubicación de la junta, detenga la aplicación de la capa adhesiva en la ubicación marcada. A medida que la pavimentadora pasa por la ubicación de la junta, apague las cintas transportadoras de material, deteniendo el flujo de material hacia el área de la regla. A medida que la regla se queda sin material, el espesor de la capa disminuye hasta que el espesor de la capa se reduce a cero.

Tenga en cuenta que estos métodos para construir una cuña temporal para abrir el tráfico no suelen utilizarse en aeródromos.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 126. Colocación de papel Kraft como separador en la junta transversal

9.2.1.2 Unión transversal laminada al final de la operación de pavimentación

Dependiendo de si la junta transversal es una junta a tope o tiene una cuña temporal para el tráfico, la operación de compactación recomendada para compactar cada una de ellas en la suspensión del pavimento es diferente. En el caso de una junta a tope, se debe colocar una tabla del grosor de la capa compactada en el extremo de la junta transversal para permitir que el tambor delantero del rodillo compacte más allá del extremo de la capa y para proteger la cara vertical. En el caso de una junta con cuña cónica, el tambor delantero del rodillo puede pasar por encima de la junta transversal y la capa cónica sin preocuparse demasiado por redondear el borde de la capa en la parte superior de la junta.

9.2.1.3 Retirada de la rampa temporal y creación de la cara vertical

Cuando se reanuda el pavimentado, se retiran y se desechan adecuadamente la cuña de material sacrificial y, si se ha utilizado, el bloque de madera y el material separador.

La malla fría se corta en línea recta hasta el punto en el que existe el espesor total de la malla transversalmente. Para realizar el corte, se utiliza una sierra eléctrica equipada con una hoja de diamante para corte en seco o una hoja abrasiva. Nunca se debe utilizar una sierra refrigerada por agua, ya que producirá una pasta húmeda que dejará una película de polvo en la cara vertical. Algunas especificaciones, especialmente en aeródromos, exigen que todas las juntas transversales se recorten con una sierra para pavimento en seco a fin de garantizar una cara vertical perfecta.

También se puede utilizar una fresadora en frío que trabaje transversalmente al pavimento para eliminar la cuña, si lo permite la especificación. No se debe permitir el fresado en frío en dirección longitudinal para eliminar la cuña, ya que el mandril de corte no puede crear una cara vertical.

Después de retirar la cuña, se debe limpiar y secar la zona situada debajo. Se aplica adhesivo tanto a la cara vertical de la junta transversal como a la superficie horizontal de la zona de la cuña. El adhesivo de la cara vertical permitirá que el lado caliente de la junta se adhiera al lado frío y selle la humedad y los contaminantes que podrían provocar el deshilachado de la junta. Al construir una junta transversal, es recomendable utilizar una regla de 3 m (10 pies) para comprobar la uniformidad del pavimento que conduce hacia y desde la junta. Sin embargo, la FAA y el Departamento de Defensa especifican una regla de 3,6 m (12 pies) para este fin. Realizar esta comprobación mientras la capa aún está caliente permite realizar correcciones añadiendo o retirando material para lograr una uniformidad aceptable.

9.2.2 Reinicio de la pavimentación

Se debe comprobar que la regla no esté deformada ni desgastada y, a continuación, se debe alinear y bajar sobre bloques de madera o listones. Al comenzar una pasada de pavimentación, los bloques se deben apilar hasta alcanzar el espesor de la nueva capa, más un 25 % adicional para compensar el deslizamiento. El deslizamiento (tratado en la sección 7.5) puede ser inferior al 25 % dependiendo de la mezcla. Cuando se continúa con una pasada de pavimentación después de la construcción de un cabezal, los bloques de madera se colocan sobre la capa fría previamente colocada con un espesor suficiente para que coincida solo con el deslizamiento previsto bajo la compactación.

El uso de estos «bloques de arranque» mantiene la regla plana en su nivel de equilibrio previsto a medida que avanza hacia la mezcla fresca situada delante de la regla. Esto minimiza la subida o bajada de la regla (que introduce rugosidad en la junta) y acorta significativamente la longitud del recorrido necesario para que la regla encuentre el equilibrio.

A continuación se indican los pasos específicos para la pavimentadora que deben realizarse en el momento de la puesta en marcha:

1. Centre los puntos de remolque a ambos lados de la pavimentadora para que tengan la máxima cantidad de ajuste vertical para proporcionar la corrección de profundidad necesaria.
2. Ponga a cero o anule el ángulo de ataque de la regla girando los tornillos de profundidad hasta obtener un movimiento de rotación libre de menos de 1/2 a 3/4 de vuelta en sentido horario y antihorario. Compruebe ambos lados para asegurarse de que la regla descansa plana en los bloques de salida. Induce el ángulo de ataque girando

los tornillos de profundidad en la dirección adecuada. La experiencia previa con una mezcla similar facilitará el ajuste del ángulo de ataque.

3. Si se utilizan controles automáticos de nivelación e inclinación, coloque el sensor de nivelación a la distancia vertical correcta con respecto a la referencia de nivelación. Una vez ajustado el sensor de nivelación, pulse el botón nulo o neutro del controlador de nivelación para finalizar el ajuste del sensor de nivelación automático. Si utiliza el sistema de control de inclinación, ajuste el ángulo de ataque, marque la inclinación adecuada y utilice el botón de reinicio para poner a cero el sistema.
4. Después de llenar la tolva receptora, supervise la mezcla mientras la cinta transportadora de listones y los sinfines llenan el área delante de la regla. Si el material no llena automáticamente las esquinas exteriores, palée la mezcla hacia los extremos para llenar la regla correctamente. A continuación, compruebe los sensores de material en los extremos de la regla para asegurarse de que funcionan correctamente y están ajustados para indexar la masa de material en movimiento (fluyendo).
5. Después de que la pavimentadora retire la junta, utilice una regla y un nivel de carpintero para verificar dos veces la pendiente especificada. Además, compruebe repetidamente el espesor con una sonda de profundidad durante los primeros 7,6 m (25 pies). Tan pronto como se establezcan y confirmen la pendiente y el nivel reales, los controles deben tomar el control y mantener el perfil deseado.

9.2.3 Juntas transversales rodantes después de reiniciar la pavimentación

El procedimiento de apisonado dependerá de si la junta de transición está confinada o no por el carril adyacente. Cuando la junta de transición está confinada por el carril adyacente, la primera pasada del rodillo se realiza con un rodillo estático de tambor de acero que se mueve en paralelo a la junta de transición durante unos metros, con el tambor principalmente en el lado frío de la junta y solapando la nueva capa entre 100 y 150 mm aproximadamente. A continuación, se comprueba la superficie con una regla y se realizan las correcciones necesarias.

A continuación, se pasa el rodillo transversalmente por la junta transversal, con aproximadamente 150 mm (6 pulgadas) del ancho del tambor sobre el material recién colocado. Esta operación debe repetirse con pasadas sucesivas, cada una de las cuales cubre entre 150 y 200 mm (6 y 8 pulgadas) adicionales sobre la nueva capa, hasta que todo el ancho del rodillo se encuentre sobre el material caliente. Cuando el LJ no está confinado, esta junta (borde) debe protegerse de los rodillos. Durante el laminado transversal, se deben colocar tablas de madera del grosor de la capa compactada en los bordes del pavimento para que el rodillo tenga una superficie sobre la que circular y salir de la capa sin deformar el borde (véase la figura 127). Se recomienda el uso de tablas para evitar un empuje excesivo de la mezcla y acelerar el proceso de compactación, pero esto puede afectar al carril adyacente del pavimento por el que circula el tráfico. Si no se utilizan tablas, el laminado transversal debe detenerse entre 150 y 200 mm antes del borde exterior para evitar dañarlo, y el borde debe compactarse más tarde durante el laminado longitudinal.

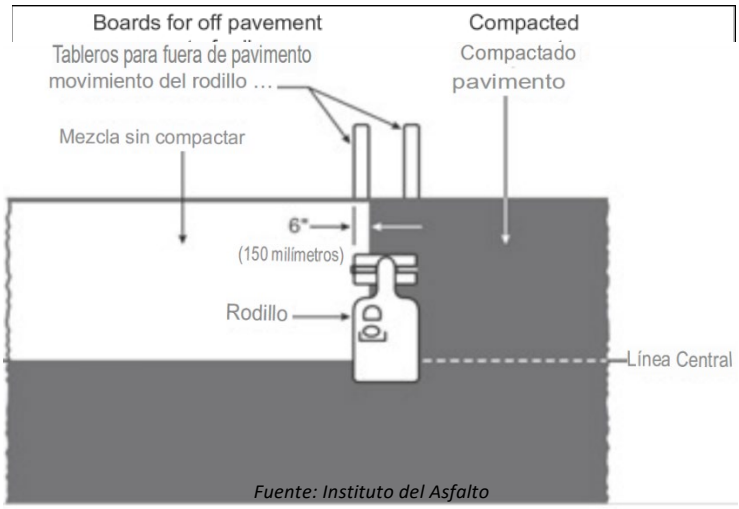


Figura 127. Apisonado del lado caliente de una junta transversal

El pavimentado y la compactación deben realizarse de manera que la junta transversal terminada tenga una transición suave a lo largo de la junta y se haya alcanzado la densidad especificada en ambos lados de la junta.

9.3 JUNTAS LONGITUDINALES

Ver vídeo:
Construcción de juntas longitudinales

El esquema de esta sección sigue la misma secuencia de pasos que cuando se construye una junta longitudinal (LJ):

1. Colocación del lado no confinado (borde)
2. Compactación del lado no confinado
3. Colocación del lado confinado
4. Enrollar el lado confinado

9.3.1 Colocación del lado no confinado (borde)

La construcción adecuada de los LJ comienza con la colocación del primer carril. Cuando se coloca el carril frío, hay al menos un borde sin confinar de la estera. El borde sin confinar debe construirse en línea recta. En el caso de pavimentación en curva, el borde debe ser liso. Se debe utilizar unacuerda y pintura, con unaguía montada en la pavimentadora, para garantizar un borde recto en el carril frío (véase la figura 128). Los bordes que no sean rectos (véase la figura 129) serán difíciles de igualar con un solapamiento constante (como se explica más adelante en este capítulo) al pavimentar el lado caliente de la junta. Esto aumenta significativamente la posibilidad de que se formen zonas de baja densidad cerca de la junta.

Se debe utilizar una cuerda y pintura, con una guía montada en la pavimentadora, para garantizar un borde recto en el carril frío.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 128. Pavimentación en línea recta con cordel, pintura y guía en la pavimentadora

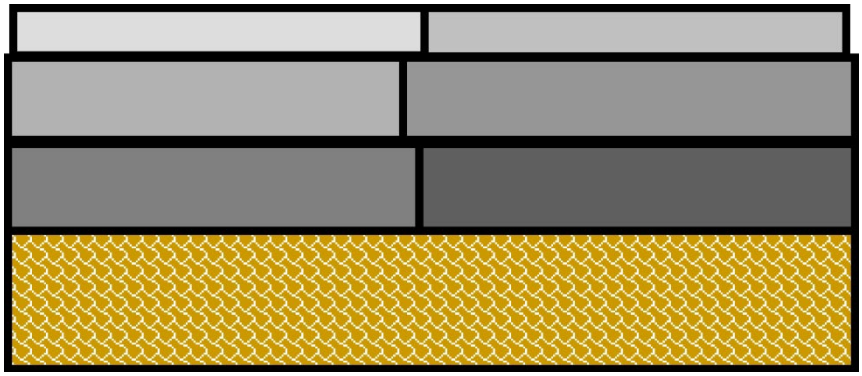
Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 12G. No pavimentar en línea recta (o de manera uniforme en una curva) hace imposible lograr una superposición uniforme

9.3.1.1 Planificación de la ubicación de las juntas longitudinales

Las juntas longitudinales deben ubicarse de forma escalonada (desplazadas) con respecto a las juntas longitudinales de la capa subyacente, con una separación mínima de 15 cm (véase la figura 130). Si las juntas longitudinales se colocan directamente unas encima de otras, habrá una mayor tendencia a que se produzcan grietas en la junta a lo largo de las distintas capas. Muchas especificaciones, incluidas las especificaciones de los aeródromos del

Departamento de Defensa y la Administración Federal de Aviación, exigen que la LJ esté separada como mínimo 1 pie de la LJ de la capa subyacente.

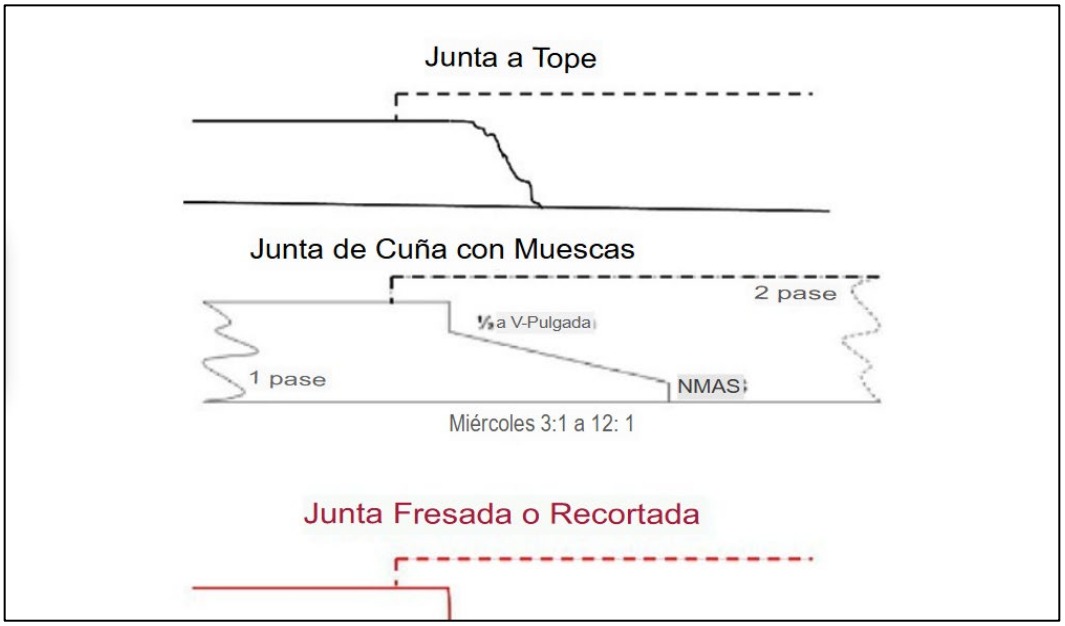


Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 130. Juntas escalonadas

Cuando se realizan proyectos de pavimentación con múltiples capas, la ubicación de los LJ en todas las capas debe planificarse teniendo en cuenta este desplazamiento mínimo. Si la carretera o el aeródromo tienen una coronación en el centro, es conveniente que la ubicación de los LJ en la capa superficial también se encuentre en la línea central. Siempre que sea posible, es mejor planificar la ubicación de los LJ de manera que los LJ de la capa superficial no queden dentro de las trayectorias de las ruedas del tráfico, las marcas de pavimento empotradas o las rayas. Por lo general, esto no es posible en los aeródromos.

Hay tres tipos de LJ fríos convencionales, como se ve en la Figura 131: a tope, con cuña dentada, y fresado o reducido. Cada uno de ellos se describirá en las tres secciones siguientes.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 131. Diferentes tipos de juntas longitudinales

9.3.1. Juntas a tope

La junta a tope es el tipo más común de LJ. Al colocar el lado no confinado, las juntas a tope comienzan con un borde bastante vertical, suponiendo que la compuerta final se haya colocado correctamente sobre la superficie existente. La vibración completa de la regla (dejando el vibrador de la regla encendido) ayuda a la consolidación de la mezcla en la parte inferior de la junta. Después de colocar la estera y durante la compactación (que se trata en la siguiente sección), el borde de la estera tiende a buscar su propio ángulo de reposo (menos vertical).

La figura 132 muestra la mala práctica de colocar la compuerta final más alta, lo que permite que la mezcla fluya por debajo de la compuerta final, lo que da lugar a una densidad muy baja después de la compactación en el borde no confinado. Esto se evita colocando la compuerta final correctamente, firmemente asentada sobre la superficie del pavimento existente.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figu r a 132. Práctica inadecuada: compuerta final no colocada sobre la superficie existente.

Las juntas a tope sin soporte de grosor considerable abiertas al tráfico pueden crear condiciones peligrosas de desnivel para los conductores. El Manual sobre dispositivos uniformes de control del tráfico (MUTCD) ofrece recomendaciones sobre señalización para advertir a los conductores de condiciones inesperadas. Cuando sea necesario un desnivel excesivo, lo mejor puede ser cerrar el carril adyacente o utilizar una junta con cuña dentada (que se describe a continuación).

9.3.1.3 *Juntas con cuña dentada*

La técnica de unión con cuña dentada (véase la figura 133) se diseñó originalmente para proporcionar al tráfico una transición más segura al cambiar de carril entre la superficie recién pavimentada y la superficie existente más baja. Muchas especificaciones de recubrimiento no permiten que el desnivel del borde del pavimento quede expuesto al tráfico y exigen que los carriles adyacentes se completen al final del día. Esta característica de seguridad aumenta la producción al permitir que el pavimentado continúe durante todo el turno de pavimentado en un carril, en lugar de retroceder a mitad del turno y cambiar el control del tráfico para pavimentar un carril adyacente.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 133. Junta con cuña dentada con ahusamiento en la parte superior e inferior de la cuña

La pasada inicial tiene una cara cónica de hasta 1 pie (300 mm) de ancho, con una pendiente que varía entre 3:1 y 12:1. La configuración de la cuña debe incluir una muesca en la parte superior y otra en la parte inferior. Se recomienda una profundidad de muesca de al menos un NMAS.

Las agencias que han adoptado el uso de la cuña ranurada suelen observar un aumento de la densidad de la junta y una mejora en el rendimiento a largo plazo de sus LJ en comparación con la junta a tope. Este no es el caso cuando se compara con la junta recortada. La cuña ranurada proporciona soporte lateral al borde no confinado durante la compactación, al tiempo que aumenta la superficie de unión entre las dos capas.

Es importante aplicar algún tipo de esfuerzo compactador al material de la cuña. La figura 134 muestra un dispositivo que forma la cuña y proporciona una compactación inicial mediante extrusión y vibración desde la regla.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 134. Dispositivo de cuña dentada que forma y compacta mediante la vibración de la regla

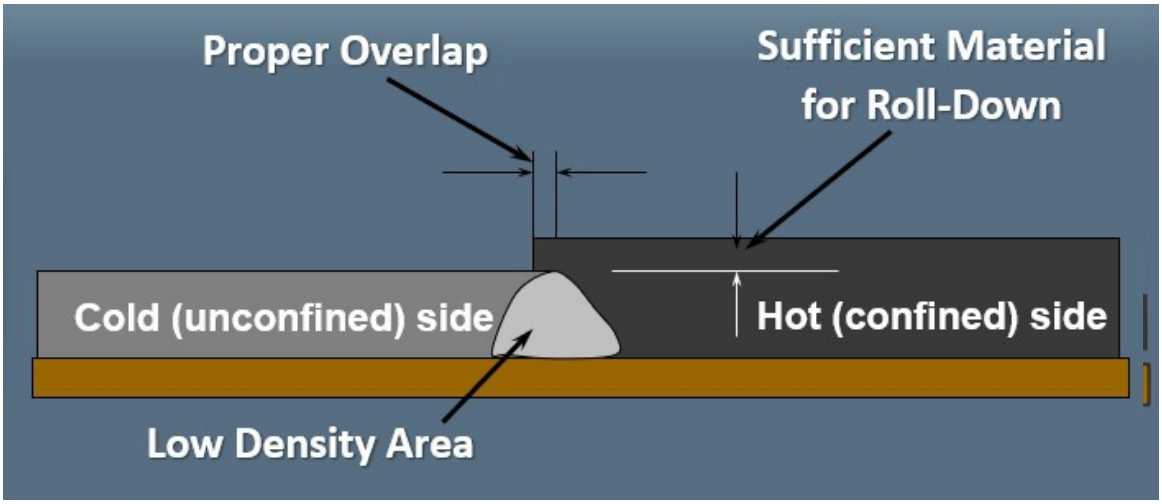
En la figura 135 se muestran una compactadora de ruedas remolcada y una compactadora de placa autovibrante remolcada.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 135. Dos dispositivos para compactar la cuña de una junta con cuña dentada

9.3.1.4 Junta fresada o recortada

Una junta fresada o recortada (denominada método de recorte) se crea eliminando físicamente entre 5 y 15 cm de material en el borde no confinado de la capa recién colocada con una rueda de corte (también conocida como cortador de pizza) o una fresadora. El método de recorte ofrece dos ventajas para el LJ: proporciona un borde casi vertical contra el que compactar y elimina el área de material de baja densidad en el borde no confinado de la primera capa (véase la figura 136).



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 136. Aspectos clave para construir una junta longitudinal duradera

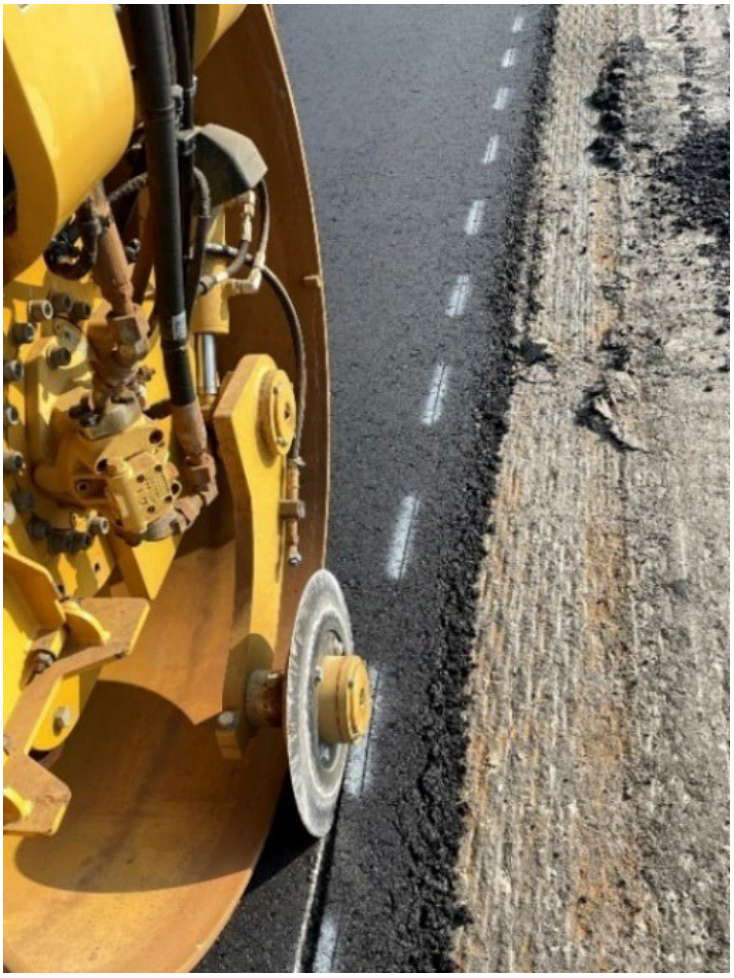
Tanto las especificaciones de pavimentación de aeródromos de la FAA como las del Departamento de Defensa exigen recortar la junta con una rueda de corte. Aunque la rueda de corte no es habitual en los proyectos de carreteras debido a los problemas de control del tráfico y a la ralentización de la producción, el fresado de la junta es una práctica habitual en Michigan para los trabajos del Departamento de Transporte, en los que se compensa al contratista por el exceso de pavimentación de la junta de hasta 2 pulgadas (medidas desde la parte superior de la capa).

Se deben seguir las siguientes prácticas estándar al recortar el LJ con una rueda de corte:

1. La cantidad de material que se debe recortar se determina generalmente por la especificación. La especificación del Departamento de Defensa para aeródromos establece actualmente un recorte de entre 3 y 6 pulgadas, mientras que la especificación de la FAA establece actualmente un máximo de 3 pulgadas.
2. La rueda de corte suele tener unos 25 cm de diámetro, con un ángulo de corte de entre 10 y 20 grados con respecto a la vertical.
3. La mezcla se corta mientras aún está caliente (entre 49 y 60 °C) para obtener un corte más limpio. Esto se conoce como el punto óptimo de temperatura.
4. La rueda de corte se puede montar en un rodillo de acero (véanse las figuras 137 y 140) o en la cuchilla o el ripper trasero de una motoniveladora (véase la figura 138). Se debe evitar el montaje en un vehículo de batalla corta, como una minicargadora. Si se monta en un

rodillo, la rueda de corte se puede utilizar sobre la superficie recién pavimentada. Si se monta en una niveladora, la rueda de corte se puede utilizar en el carril adyacente que se va a pavimentar para evitar la formación de surcos en la capa recién pavimentada que aún no se ha enfriado por completo.

5. Los recortes deben retirarse cuidadosa y completamente antes de colocar la capa caliente. Una placa de expulsión que empuje los recortes lejos de la junta puede ser útil (véase la figura 139). Cualquier material suelto debe retirarse, a mano si es necesario. Todos los recortes pueden recogerse y utilizarse como RAP.
6. Es fundamental que los cortes sean rectos y sin desviaciones para facilitar un solapamiento uniforme sobre la capa fría cuando se coloca la capa caliente. El uso de un cordel como referencia, pintura saltada y una guía montada en la parte delantera del rodillo o niveladora para que el operador la siga puede ayudar a garantizar un corte recto (véanse las figuras 137, 138 y 140).
7. No se debe utilizar agua y, sobre todo, ningún agente desmoldeante para facilitar el corte, ya que esto impedirá la unión necesaria entre las dos capas.
8. El corte debe proporcionar una cara limpia, sólida y casi vertical en toda la profundidad de la elevación.



Fuente: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

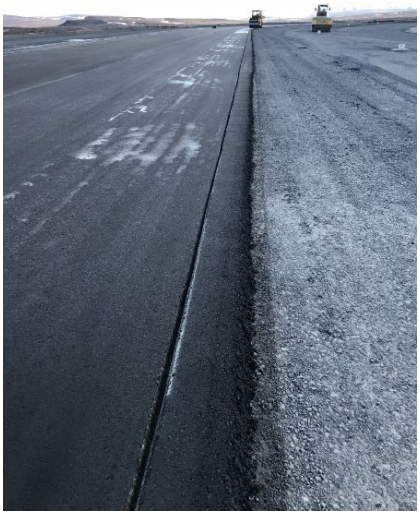
Figura 137. Rueda de corte montada en un rodillo

Fuente: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

Figura 138. Rueda de corte acoplada al ripper trasero de una niveladora

Fuente: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

Figura 13G. La placa de expulsión ayuda a eliminar la mezcla de cutback



Fuente: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

Figura 140. El cordel, la pintura y una guía montada permiten un corte recto

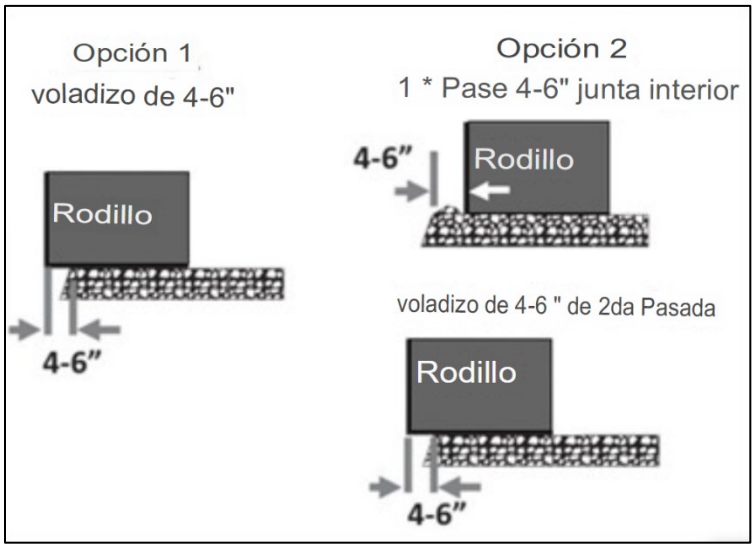
9.3.2 Rodar el lado sin confinar

Es fundamental prestar atención al compactar la junta sin confinar, ya que la densidad de la estera suele ser menor en el borde sin soporte. El borde sin confinar debe compactarse con un rodillo de tambor de acero lo antes posible, mientras la estera está más caliente.

Hay dos opciones recomendadas para un patrón de rodadura de la junta sin confinar que optimiza la densidad. La opción 1 consiste en pasar el rodillo por primera vez con el tambor de acero sobresaliendo del borde de la estera entre 4 y 6 pulgadas (100 y 150 mm). Un solapamiento superior a 6 pulgadas puede ejercer demasiada fuerza en el borde de la estera, lo que provocaría un enrollamiento excesivo. Si se intenta lograr un solapamiento inferior a 4 pulgadas, es posible que el tambor corte ocasionalmente el borde de la junta no confinada. La opción 2 consiste en que la primera pasada se mantenga dentro del borde de la estera entre 4 y 6 pulgadas y la segunda pasada sobresalga del borde entre 4 y 6 pulgadas. Ambas opciones se ilustran en la figura 141.

Es fundamental prestar atención al laminar la junta no confinada, ya que la densidad de la estera suele ser menor en el borde sin soporte. El borde no confinado debe compactarse con un rodillo de tambor de acero lo antes posible, mientras la estera está más caliente.

Los defensores de la opción 2 creen que hay menos movimiento lateral del borde sin soporte debajo de la estera. Una preocupación con la opción 2 es que se puede producir una grieta por tensión en el borde del tambor de acero durante su primera pasada (de 4 a 6 pulgadas dentro del LJ). Esa posible grieta por tensión puede no ser visible hasta meses o años después. Los defensores de la opción 1 están preocupados por la posibilidad de que se produzca esta grieta por tensión y/o creen que es mejor apisonar el borde cuando está más caliente.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 141. Dos opciones para compactar el LJ sin confinamiento

A continuación se indican los factores que deben tenerse en cuenta a la hora de decidir entre la opción 1 y la opción 2:

- Mediciones de densidad cerca del borde sin soporte.
- Propiedades de la mezcla u otros elementos que puedan crear un movimiento lateral excesivo.
- Excesivo deslizamiento en el borde de la estera.
- Posibilidad de grietas por tensión con la opción 2.

9.3.3 Colocación del lado confinado

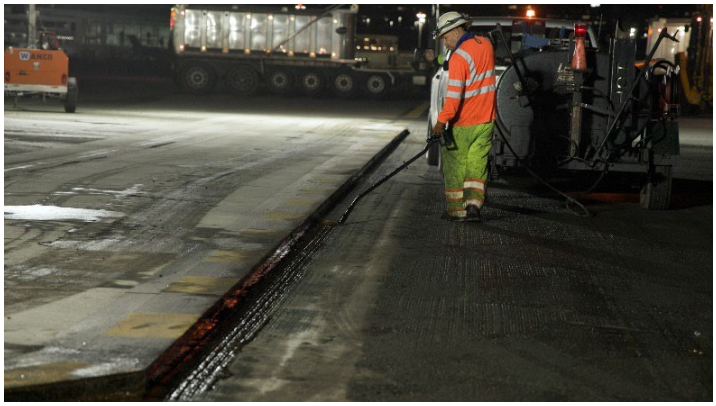
A continuación se indican tres consideraciones clave que deben tenerse en cuenta al colocar el material caliente. Parte del LJ que se tratará en esta sección:

- Fijación/adhesión de la cara casi vertical antes de la colocación.
- Disponer de suficiente mezcla de rodillo para evitar que los rodillos se unan sobre la malla fría.
- Lograr el solapamiento adecuado de la manta caliente sobre la manta fría.

9.3.3.1 Fijación de la cara vertical

Antes de colocar la capa caliente, la superficie fría casi vertical de la junta debe recibir como mínimo una capa gruesa de material emulsionado de adherencia, independientemente de si se trata de una junta a tope o una junta con corte. Incluso una junta con cuña dentada se beneficiará de la aplicación de adherencia, siempre y cuando el material no se filtre hacia la superficie.

Un tratamiento más sustancial de la cara de la junta fría es la aplicación de un aglutinante asfáltico o, mejor aún, un sellador de juntas recubierto de caucho (también llamado adhesivo para juntas), como se ve en la figura 142. La pulverización de aglutinante asfáltico caliente sobre la cara de la junta da como resultado más asfalto residual en comparación con una emulsión asfáltica. El uso de un adhesivo de junta recubierto de caucho proporciona la mejor unión en la junta fría. Muchos estados exigen que se pinte la cara vertical con un ligante asfáltico o que se aplique un adhesivo de junta recubierto de caucho para mejorar la durabilidad de la junta.



Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos

Figura 142. Aplicación de adhesivo para juntas en la superficie de la junta en frío

9.3.3.2 Material suficiente para el laminado

La figura 144 muestra uno de los aspectos clave para construir un LJ duradero: disponer de material suficiente para el laminado. El laminado del material se trató en la sección 7.5, y la regla general es del 25%, aunque varía en función de la mezcla. La altura de la capa caliente sin compactar se establece en función del factor de compactación. Es fundamental que haya suficiente espesor en el lado caliente de la junta para lograr una compactación completa antes de que el rodillo de acero compacte la capa fría. Si se coloca material insuficiente, se producirá un «puenteo» del rodillo de acero sobre la capa fría antes de que se logre la densificación completa en el lado caliente. Esto crea una junta condenada al fracaso con el material de baja densidad en el lado caliente de la junta, lo que da como resultado un área permeable al agua y al aire con poca durabilidad. Una junta completada con un espesor de mezcla insuficiente puede parecer mejor inicialmente, pero funcionará peor que una junta bien compactada.

Es fundamental que haya suficiente espesor en el lado caliente de la junta para un enrollado y compactación completos antes de que el rodillo de rueda de acero compacte la capa fría.

Los proyectos con especificaciones de suavidad o deslizamiento especificaciones requerirán el uso de vigas de referencia móviles o esquís (véase la sección 7.4.2.1) en los ascensores inferiores. Si se cumple la especificación de suavidad en el último ascensor intermedio se aplica, entonces la superficie se puede pavimentar con el espesor requerido utilizando un sensor de nivelación adecuado. Si la capa superficial requiere el uso de un esquí para cumplir con la especificación de suavidad final, el esquí solo debe utilizarse en el lado frío de la junta y un sensor de nivelación adecuado debe utilizarse en el lado caliente de la junta. El uso del esquí en el lado caliente de la junta dará lugar a un espesor no uniforme en toda la junta, lo que puede provocar una menor densidad a lo largo de la misma. Esto se debe a que el esquí promedia el espesor de la capa requerido a lo largo de la longitud del esquí (de 9 a 12 metros) y puede que no siempre proporcione la cantidad correcta de mezcla para la junta.

El uso del sensor de nivelación de la pavimentadora como dispositivo de ajuste de juntas, que toma una sola lectura justo delante de los sinfines, permite obtener con mayor precisión la altura correcta del material en la junta. El dispositivo de ajuste de juntas mide continuamente el espesor de la capa a lo largo de la junta y proporciona la cantidad necesaria de material en cada ubicación precisa. La sección
7.4.2.2 trata sobre los dispositivos de ajuste de juntas.

9.3.3.3 Superposición adecuada

El otro aspecto clave para construir un LJ duradero es mantener constantemente la cantidad correcta de solapamiento entre la esterilla caliente y la esterilla fría (ilustrado en la figura 143). La cantidad correcta de solapamiento es de 1±1/2 pulgada (25±12,5 mm) para una junta a tope. Si la junta se recorta, la cantidad correcta de solapamiento es menor, con un objetivo de 1/2±1/2 pulgada (12,5±12,5 mm). Como se mencionó anteriormente, será difícil mantener este solapamiento correcto si la primera pasada no se pavimentó en línea recta (o de manera uniforme en una curva). El operador de la regla debe seguir de cerca la línea de unión y controlar el solapamiento para mantener esta tolerancia ajustada. Una regla de ancho variable (si está equipada) puede ser útil para mover la regla hacia adentro o hacia afuera según sea necesario.

Puede que no todo el mundo esté de acuerdo con que la cantidad correcta de solapamiento sea la recomendada anteriormente, pero no hay duda de que es necesario cierto solapamiento. Si no se busca un cierto solapamiento, habrá casos en los que se produzca un hueco en la unión, lo que dará lugar a una baja densidad y a una probable grieta.

No es necesario retirar el material sobrante de la alfombrilla fría y colocarlo sobre la alfombrilla caliente si se mantiene el solapamiento adecuado (tal y como se indica en el párrafo anterior). La pequeña cantidad de solapamiento no creará mucho material suelto en la superficie después del laminado, y ese material se desprenderá rápidamente.

Fuente: Frank Colella

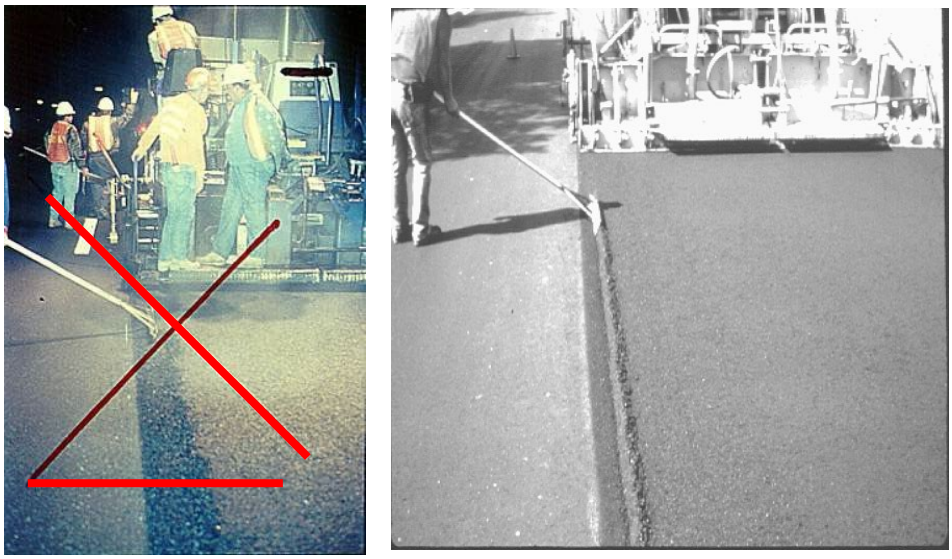
Figura 143. Superposición adecuada al colocar el lado confinado de una junta longitudinal

Si se golpea el material superpuesto, es fundamental que solo se golpee justo sobre la malla caliente y no se empuje más allá. No se debe alterar el material enrollado justo en el lado caliente de la junta;

Debe evitarse el sellado agresivo que se extiende a través de la junta caliente, ya que eliminará el material enrollado justo en el lado caliente de la junta, lo que dará lugar a una baja densidad.

debe permanecer para lograr la densidad adecuada. Debe evitarse una cementación agresiva que se extienda a través de la junta caliente, ya que eliminará el material enrollado justo en el lado caliente de la junta, lo que dará lugar a una baja densidad, como se ha descrito anteriormente en esta sección. Esto también puede provocar la segregación del material en la superficie. En la imagen izquierda de la figura 144 se muestra una cementación incorrecta del LJ, mientras que en la imagen derecha se muestra una cementación adecuada.

Si se realiza con cuidado y correctamente, la cementación de la superposición puede ser beneficiosa. Si se realiza incorrectamente, el sellado de la superposición puede provocar graves fallos en las juntas.



Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 144. Sellado inadecuado del LJ *(izquierda)*, que priva al lado caliente del material de rodadura, y sellado adecuado del LJ *(derecha)*

Otra consideración a tener en cuenta a la hora de decidir si sellar o no es la seguridad. En los proyectos de carreteras, el tráfico en los carriles adyacentes puede hacer que la operación de sellado sea muy peligrosa. Esto no es un problema en los proyectos de aeropuertos, donde toda la zona está cerrada al tráfico.

Se debe evitar esparcir material adicional sobre la pista caliente, ya que esto dará lugar a la formación de agregados gruesos en la superficie que pueden desprenderse con el tiempo, especialmente en aeródromos donde los objetos extraños (FOD) son un problema importante. En la figura 145 se muestra un ejemplo de esparcimiento inadecuado y sellado incorrecto de la junta.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 145. Esparcimiento y sellado inadecuados a lo largo de la junta LJ

9.3.4 Rodillo del lado confinado

La junta confinada debe compactarse con la primera pasada de un rodillo de tambor de acero sobre la capa caliente, con el borde del tambor a una distancia de entre 150 y 300 mm (6 y 12 pulgadas) del LJ. A continuación, se aplica la segunda pasada solapando la capa fría entre 75 y 150 mm (3 y 6 pulgadas). La primera pasada crea una franja sin compactar de entre 15 y 30 cm de ancho, donde cualquier movimiento lateral empuja la mezcla sobrante hacia esta franja. La segunda pasada compacta esta franja sin compactar con todo el peso del rodillo.

La razón principal para mantenerse alejado de la junta en la primera pasada es evitar el puenteo del tambor del rodillo en el borde frío. Como se describió anteriormente en la sección 9.3.3.2, el «puenteo» hace que no se aplique más esfuerzo de compactación. Al mantenerse alejado de la junta entre 15 y 30 cm, la mezcla se desplaza ligeramente hacia los lados dentro de la junta, lo que da como resultado un poco más de mezcla y una mayor densidad en esta zona. Este patrón de rodadura recomendado para compactar juntas confinadas también garantiza que la primera y la segunda pasada se realicen con la mayor parte del rodillo sobre la capa caliente.

Los rodillos con neumáticos de goma, especialmente los rodillos vibratorios con neumáticos de goma, han demostrado ser muy eficaces para optimizar la densidad en el lado confinado de la junta.

9.4 PAVIMENTACIÓN Y APISONADO ECHELON

Ver vídeo:
Pavimentación escalonada

Dado que los LJ suelen ser susceptibles de deteriorarse prematuramente, es aconsejable reducir el número de juntas longitudinales en un proyecto siempre que sea posible. Si la organización del proyecto y el control del tráfico permiten pavimentar varios carriles o arcenes en una sola pasada con extensiones de regla, se puede eliminar al menos una junta. La sección 7.3 trata sobre las reglas y las extensiones de regla, e incluye fotografías.

Otra excelente opción para reducir el número de juntas longitudinales es utilizar la pavimentación escalonada si la organización del proyecto, la logística y el control del tráfico lo permiten. En la pavimentación escalonada, los carriles adyacentes se colocan y compactan uno al lado del otro al mismo tiempo con múltiples trenes de pavimentación. La junta LJ creada entre estos trenes de pavimentación se denomina junta caliente porque ambos lados están calientes cuando se colocan y compactan. La experiencia ha demostrado que las juntas en caliente de la pavimentación en escalón tienen un mejor rendimiento a largo plazo en comparación con las juntas en frío.

La experiencia ha demostrado que las juntas en caliente de la pavimentación escalonada tiene un mejor rendimiento a largo plazo en comparación con las juntas en frío.

El pavimentado escalonado no es habitual en proyectos de carreteras, ya que normalmente es necesario mantener el flujo de tráfico, por lo que resulta difícil cerrar varios carriles. Los aeródromos, los grandes aparcamientos comerciales y la construcción de nuevas autopistas son ejemplos en los que se debe considerar el pavimentado escalonado (véase la figura 146).

Fuente: Aeropuerto Internacional de Dallas-Fort Worth

Figura 146. Pavimentación escalonada con cuatro trenes de pavimentación en una pista del aeropuerto DFW.

El factor limitante en el número de trenes de pavimentación utilizados con la pavimentación escalonada suele ser la producción total de la mezcla para alimentar a las pavimentadoras. Lo más habitual es utilizar dos trenes de pavimentación

en el pavimentado escalonado, mientras que el uso de cuatro trenes de pavimentación, como se ve en la Figura 146, es extremadamente raro.

Las franjas se colocan simultáneamente con los adoquines separados por una distancia corta, normalmente inferior a 100 pies (30 m). Esta corta distancia permite que las esteras se suelden eficazmente entre sí mediante el tren de compactación antes de que se enfríe la mezcla a ambos lados de la junta. El solapamiento suele ser de 1 pulgada (25 mm).

Se recomienda disponer de un tren de rodillos estándar detrás de cada extendedora. Para maximizar la densidad en la junta caliente, el rodillo de compactación que sigue a la extendedora principal debe dejar sin compactar aproximadamente entre 4 y 6 pulgadas (100 y 150 mm) del borde común o la junta. A continuación, esta junta común se compacta con la primera pasada del rodillo de compactación que sigue a la segunda pavimentadora. Para lograrlo de manera eficaz, la segunda pavimentadora debe mantenerse lo más cerca posible de la primera para minimizar cualquier diferencia de temperatura entre cada lado de la junta. El material de cada lado se convierte en una sola masa bajo el rodillo, y hay poca o ninguna diferencia de densidad entre los dos carriles.

9.5 MÉTODOS NO CONVENCIONALES DE UNIÓN LONGITUDINAL

En este capítulo ya se han tratado muchas técnicas, opciones y productos LJ que pueden no se consideran «convencionales». Entre ellos se incluyen los siguientes:

- Mantener siempre la contención al colocar y compactar el LJ (secciones 9.3.3 y 9.3.4). Esto se puede lograr fresando y pavimentando un carril a la vez, en lugar de fresar varios carriles.
- Pavimentación más ancha y pavimentación escalonada (sección 9.4).
- Fresar o recortar la junta (sección 9.3.1.4).
- Adhesivos de junta recubiertos de caucho aplicados a la cara de la junta (Sección 9.3.3.1).
- Utilización de rodillos con neumáticos de goma (neumáticos) al compactar el lado caliente de la junta (Secciones 9.3.4 y 8.3.2).

Hay otras tres técnicas no convencionales que aún no se han mencionado: calentadores de juntas, selladores de superficies y membranas asfálticas reductoras de huecos (VRAM). Las tres se desarrollaron con la intención de mejorar el rendimiento del LJ. No están respaldadas por los autores ni los patrocinadores de este manual, sino que se mencionan para incluir otras técnicas no convencionales que aún no se han mencionado aquí.

Calentadores de juntas: el uso de calentadores de juntas por infrarrojos para calentar la superficie de la junta fría justo antes de colocar el lado confinado. Estos calentadores se utilizan con mayor frecuencia en climas fríos y en pavimentaciones en condiciones climáticas frías. Algunos estudios recientes han demostrado que los calentadores pueden mejorar la densidad de las juntas entre un 1 y un 2 %. Se debe tener cuidado de no sobrecalentar la junta y causar daños al aglutinante. La tecnología de los calentadores ha mejorado e incluye ahora calentadores infrarrojos más largos y eficientes, así como la automatización con la velocidad de la pavimentadora para minimizar el sobrecalentamiento o el calentamiento insuficiente de la junta. La figura 147 muestra los dos tipos generals de calentadores de

de juntas: los que son unidades autónomas que funcionan delante de la pavimentadora y los que están montados en la propia pavimentadora.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figura 147. Calentadores de juntas: autónomos *(izquierda)* y montados en la pavimentadora *(derecha)*

Productos selladores y rejuvenecedores de superficies: se pulverizan sobre la junta terminada con un ancho típico de 1 a 2 pies. Estos tratamientos tópicos se aplican cuando la junta es nueva o después de que la junta ha estado en servicio durante algún tiempo. Algunos estados los utilizan como medida correctiva cuando no se alcanza la densidad mínima en la junta. Estos productos sellan la junta de arriba abajo para reducir la absorción y la permeabilidad. También se les conoce como estabilizadores o enriquecedores de juntas. Otro tipo de producto sellador de juntas es la emulsión de penetración rápida (RPE), que es una emulsión asfáltica que contiene entre un 30 y un 40 % de ligante asfáltico y está diseñada para penetrar en los huecos del pavimento asfáltico. La naturaleza penetrante de la RPE es importante porque lleva los residuos de asfalto a los huecos y reduce la intrusión de aire y agua, al tiempo que mantiene la textura del pavimento. La figura 148 muestra una aplicación de RPE y una aplicación de un rejuvenecedor que se seca transparente. Es necesario volver a pintar las líneas con RPE y otros selladores de superficie a base de asfalto, como los selladores de niebla o los microrecubrimientos, pero no es necesario con muchos de los productos rejuvenecedores que se secan transparentes. Estos selladores de superficie se utilizan a menudo sobre las bandas sonoras de la línea central. Al igual que todas estas técnicas no convencionales, es necesario investigar más sobre sus beneficios a largo plazo.

Fuente: Asphalt Materials, Inc.

Figura 148. Selladores superficiales en LJs: RPE *(izquierda)* y rejuvenecedor VRAM (*derecha*)

En lugar de sellar las juntas longitudinales desde la superficie hacia abajo, el producto denominado VRAM está diseñado para sellar la junta desde abajo hacia arriba. El uso de VRAM implica aplicar una franja gruesa (1 gal/yd² para una carpeta de 1.5 pulgadas) de aproximadamente 18 pulgadas de ancho de un ligante asfáltico modificado con polímeros en el área donde se centrará la nueva junta. El lado frío se coloca y compacta pasando sobre la mitad del ancho de la franja. La Figura 149 muestra dos métodos para colocar la franja gruesa y luego pavimentar sobre ella. El lado caliente se coloca y compacta como una junta convencional. El ligante modificado con polímeros migra hacia la mezcla en el área de la junta, llenando los vacíos desde abajo hacia arriba, reduciendo la intrusión de agua en la junta y protegiendo las capas inferiores del pavimento. Actualmente no existe una forma comprobada de obtener una medición exacta de los vacíos de aire in situ en mezclas donde se utiliza VRAM.

Fuente: Asphalt Materials, Inc.

Figura 149. El VRAM se aplica con una caja de extendido manual *(izquierda*) o con un distribuidor modificado *(centro),* y luego se pavimenta encima *(derecha).*

10. Segregación

10.1 INTRODUCCIÓN

Ver Videos:
Segregación en la planta de asfalto
Segregación en el sitio de obra

La segregación es la falta de uniformidad física y/o térmica en una mezcla asfáltica. La segregación es un defecto de construcción y resulta perjudicial para el desempeño del pavimento.

La segregación física es simplemente una distribución no uniforme de las partículas de agregado dentro de una mezcla asfáltica. Las zonas de la mezcla colocadas con concentraciones de partículas de mayor tamaño tendrán mayores vacíos de aire después de la compactación, los cuales probablemente estarán interconectados, haciendo que la capa compactada sea permeable.

La segregación es un defecto de construcción y resulta perjudicial para el desempeño del pavimento.

La mezcla térmicamente segregada puede cumplir con los parámetros del diseño de mezcla, pero puede presentar diferencias de temperatura dentro de la carpeta recién colocada, lo que resulta en una compactación no uniforme

Cuando ocurre segregación, la carpeta terminada tendrá una textura variable y puede no cumplir con los requisitos de especificación para textura superficial, regularidad o densidad. Las zonas segregadas difieren del diseño de mezcla aprobado, y esas áreas no cumplirán con las propiedades volumétricas requeridas.

La segregación suele entenderse como segregación física; por lo tanto, la segregación térmica debe identificarse explícitamente como tal en discusiones y textos.

10.1.1 Razones de la segregación y sus consecuencias

La relación entre el peso y el área superficial de una partícula de agregado grande es mayor que la de una partícula pequeña; por lo tanto, los agregados grandes tienden a migrar más fácilmente fuera de la masa. Esta migración del agregado suele ser el resultado de fuerzas gravitacionales mientras el agregado está en movimiento. Así, la segregación física ocurre cuando los agregados se almacenan en pilas y los agregados más grandes ruedan hacia abajo por el exterior de la pila, dejando atrás los más pequeños. Un comportamiento similar ocurre cuando la mezcla cae en silos de almacenamiento, durante la carga y descarga de camiones, y dentro de la pavimentadora cuando la mezcla es empujada hacia adelante sin confinamiento. Estas acciones permiten que el agregado más grande de la mezcla, incluso cuando está recubierto con ligante, migre.

La segregación física y térmica da como resultado una menor densidad, un mayor porcentaje de vacíos de aire y permeabilidad en la carpeta. La intrusión de aire y agua provoca la desintegración de la mezcla compactada. Con el tiempo esto lleva a fallas prematuras del pavimento y, en aeropuertos, a la aparición de FOD (Foreign Object Debris). La consecuencia es la necesidad de mantenimiento prematuro con reparaciones localizadas o, según la magnitud y severidad, una remoción y reemplazo total.

Las pruebas de permeabilidad en mezclas compactadas pueden determinar el porcentaje crítico de vacíos de aire a partir del cual estos vacíos se vuelven interconectados, permitiendo la intrusión de aire y agua en la carpeta. En mezclas densas con NMAS de 1/2 y 3/4 de pulgada, los vacíos de aire suelen volverse interconectados a 8 % o más. En mezclas con NMAS mayor, esta transición hacia la permeabilidad puede ocurrir incluso con contenidos de vacíos de aire más bajos. La permeabilidad aumenta a medida que el NMAS aumenta y la densidad disminuye.

10.1.2 Lugares donde puede originarse la segregación

La segregación tiende a ocurrir con mayor frecuencia en cinco etapas: manejo de agregados, producción de la mezcla, almacenamiento de la mezcla, transporte y colocación. Las áreas donde se requiere trabajo manual también son más susceptibles a segregarse. La observación cuidadosa y el control de las operaciones de mezclado y colocación durante estas etapas pueden reducir o eliminar la segregación en la mayoría de las mezclas asfálticas. El beneficio económico de reducir o eliminar la segregación es ampliamente reconocido, y las agencias que especifican pavimentos asfálticos están prestando cada vez más atención a métodos para controlarla.

Las mezclas asfálticas con agregado grueso de gran tamaño, bajo contenido de ligante asfáltico o que son abiertas o discontinuas (gap-graded) tienden a segregarse más que una mezcla densa con mayor contenido de asfalto y agregado grueso de menor tamaño.

Cuando se observa segregación, hay muchos puntos del proceso que deben inspeccionarse. La inspección comienza con el manejo y apilamiento de agregados, luego los múltiples detalles de la planta de producción de la mezcla, los silos y dosificadores, los procedimientos de carga y descarga de camiones, y finalmente las operaciones de la pavimentadora.
Existen varios pasos en el proceso de producción que vuelven a mezclar el material para ayudar a reducir la segregación.

La práctica de rastrillar en exceso los bordes y juntas de la carpeta debe minimizarse, ya que esto también puede causar segregación.

10.1.3 Oportunidad Temprana para Observar y Corregir

La segregación física suele reconocerse primero de manera visual en la carpeta pavimentada. En ese momento se requiere una acción temprana para evitar que el problema continúe. Es necesario determinar la(s) causa(s) y realizar los ajustes correspondientes. Identificar las causas y corregir la segregación en la carpeta es un proceso que se realiza trabajando hacia atrás: desde el proceso de pavimentación, pasando por el transporte y la carga, el almacenamiento de la mezcla, la producción de la mezcla y, finalmente, el manejo de agregados.

En la regla (screed) de la pavimentadora, se debe verificar que la mezcla sea manejada correctamente por los sin-fines (augers). Cuando se pavimenta a un ancho grande sin las extensiones adecuadas de sin-fines y túneles, la mezcla cae en cascada por falta de soporte, y el potencial de segregación aumenta significativamente (ver Figura 150).

Fuente: Industria de Pavimentación asfáltica de Hawái

Figura 150. Extensiones inadecuadas de sinfines y túneles que causan segregación

En la tolva de la pavimentadora, esta debe mantenerse al menos a 1/3 de su capacidad, por encima de la parte superior de la(s) abertura(s) del túnel del transportador de tablillas.

Las alas de la tolva solo deben plegarse al final de la jornada de pavimentación. La mezcla atrapada en las esquinas debe dejarse allí para que toda la mezcla recién depositada siga fluyendo sin quedar atrapada en puntos muertos de la tolva de la pavimentadora.

El uso de un MTV (Material Transfer Vehicle) puede ayudar a eliminar tanto la segregación física como la segregación térmica que ocurre antes de que la mezcla llegue a la pavimentadora. Descargar la mezcla directamente desde el camión a la tolva de la pavimentadora puede generar segregación, especialmente con el tiempo. Los MTV que entregan la mezcla directamente a un inserto de tolva reducen la posibilidad de segregación en esa zona de la pavimentadora. Los elevadores de cordón (windrow elevators) también pueden usarse para remezclar la mezcla, como se explica en la Sección 7.2.3.

El uso de un MTV puede ayudar a eliminar tanto la segregación física como la térmica que ocurre antes de que la mezcla llegue a la pavimentadora.

Reconocer todas las posibles oportunidades de segregación dentro de la planta de producción es responsabilidad del operador de planta, el inspector, el contratista, y en algunos casos también del fabricante del equipo.

Un fresado incorrecto (milling) que deja desechos o restos del pavimento anterior especialmente cuando se va a colocar una capa delgada puede generar segregación porque produce variaciones en cómo fluye la mezcla debajo de la regla de la pavimentadora.

Los espesores de sobrecapa que son menores a tres veces el NMAS tienden a presentar segregación cuando se colocan sobre una superficie fresada.

Además, el RAP mal procesado que contiene aglomeraciones de material de gran tamaño puede impedir una colocación de la carpeta (mat) uniforme y continua.

10.2 RECONOCER LA SEGREGACIÓN FÍSICA, SUS CAUSAS Y SUS SOLUCIONES

Los siguientes son los tipos de segregación más comunes en la carpeta asfáltica:

- Manchas en forma de “chevron” al inicio y al final de las cargas de los camiones.
- Rayas en el centro del pavimentador (paver).
- Segregación en los bordes.
- Rayas longitudinales continuas en uno o ambos lados del carril.
- Manchas aleatorias que aparecen de manera intermitente a lo largo de la vía.

Reconocer el tipo desegregación hará más fácil identificar su causa.

10.2.1 Segregación al final del camión

La segregación al final del camión (end-of-truckload segregation) aparece a intervalos regulares que coinciden con el inicio y el final de cada ciclo de descarga del camión.

Si los camiones se cargan o descargan de forma incorrecta, un mix propenso a segregarse se separará cuando comienza a vaciarse el material y nuevamente cuando sale la última parte del contenido de la tolva. Esto produce áreas segregadas repetidas de manera uniforme a lo largo del camino, tal como se muestra en la Figura 151.

Fuente: Instituto del asfalto

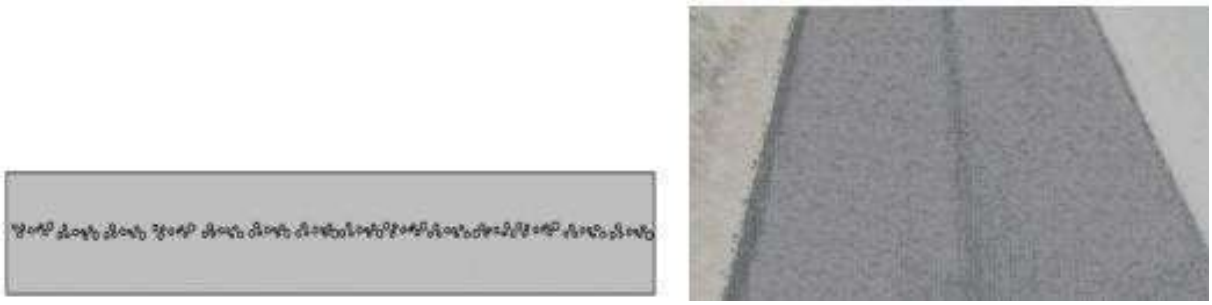
Figura 151. Ejemplos de segregación al final del camión

La segregación al final del camión puede tener varias causas. La más común es la forma incorrecta de cargar el camión desde el silo. Si la mezcla se descarga en una sola caída dentro de la tolva del camión, los agregados gruesos tienden a rodar hacia la parte delantera y hacia la compuerta trasera. Este rodamiento de agregados grandes empeora si el operador de planta abre y cierra repetidamente las compuertas del silo al final del proceso de carga para asegurarse de que el camión reciba el peso máximo permitido de mezcla. Cuando la segregación ocurre

a lo largo de los costados de la tolva del camión durante la carga, esa misma segregación se refleja después en la pavimentadora al momento de descargar. El material segregado o el material que va cayendo lentamente en el borde externo de la tolva de la pavimentadora se acumula en las alas laterales de la tolva. Si esas alas se abren y cierran en cada descarga, la mezcla acumulada en esos puntos se incorpora de manera irregular al flujo principal, lo que agrava las zonas segregadas en la carpeta detrás de la pavimentadora.

10.2.2 Segregación en la línea central

La segregación en la línea central (ver Figura 152) es causada por el conjunto de engranajes que impulsa los sinfines. Cuando están colocados demasiado bajos, los sinfines y el conjunto de engranajes pueden no proporcionar el espacio suficiente para que la mezcla fluya de regreso hacia el centro de la carpeta que se está colocando. El resultado será una mezcla insuficiente y segregada en el centro de la carpeta. Cuando esto ocurre, la solución es elevar el conjunto de engranajes del sinfín para dar más espacio y permitir que la mezcla fluya hacia el centro.



Fuente: Instituto del asfalto
Figura 152. Ejemplos de segregación en la línea central.

La mayoría de las pavimentadoras cuentan con tolva de flujo inverso o “kickback” ubicados junto al conjunto de engranajes de las tolvas para reducir la segregación en la línea central. A veces, estos sinfín se desgastan o se rompen y necesitan ser reemplazados.

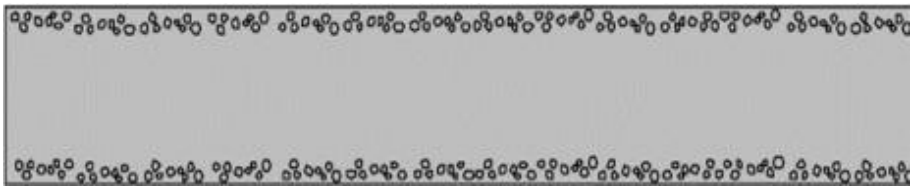
10.2.3 Segregación en Juntas y Bordes

Cuando la mezcla no está confinada correctamente en los extremos exteriores de la regla (screed), puede ocurrir segregación. Esto es especialmente común al pavimentar anchos grandes sin extensiones de sinfín y túnel. Cuanto más se empuje la mezcla hacia los lados con los sinfines sin una extensión, mayor será la segregación. Además, se recomienda extender el túnel (placa de confinamiento) para evitar que la mezcla se segregue hacia adelante. Cuando la mezcla fluye hacia adelante, puede producirse segregación vertical, que es menos visible en la superficie, pero que los núcleos de extracción mostrarán con los agregados más grandes en el fondo de la capa (ver Figura 153).

Fuente: American Society of Civil Engineers

Figura 153. Segregación vertical (superior diferente al fondo de la sección transversal)

La segregación en juntas también puede ocurrir cuando los rastrillos (rakers) hacen correcciones cerca de la junta (ver Figura 154). Se recomienda superponer la junta aproximadamente 1 pulgada y permitir que el rodillo compacte esta superposición sin rastrillar ni aplicar mezcla adicional. Cualquier agregado triturado se desgastará con el tiempo.



Fuente: Instituto del asfalto

Figura 154. Ilustración de la segregación en juntas

10.2.4 Segregación de la Carpeta Completa o de Media Anchura

La segregación de la carpeta completa o de media anchura (ver Figura 155) puede ocurrir por varias razones.

La primera razón es que uno o ambos sinfines recibieron mezcla insuficiente. Para evitar esto, la mezcla debe mantenerse siempre cerca del eje de los sinfines y a una altura uniforme a lo largo de la cámara de los sinfines.

La segunda razón es que la mezcla se cargó incorrectamente en el camión de acarreo. Si la mezcla no se coloca en el centro del ancho de la tolva del camión, los agregados gruesos pueden rodar hacia un lado y acumularse a lo largo de ese costado. Cuando la mezcla se entrega a la tolva de la pavimentadora, la mezcla segregada se colocará sobre la carretera en el mismo lado, y la segregación aparecerá como una franja longitudinal en un solo lado de la pavimentadora.

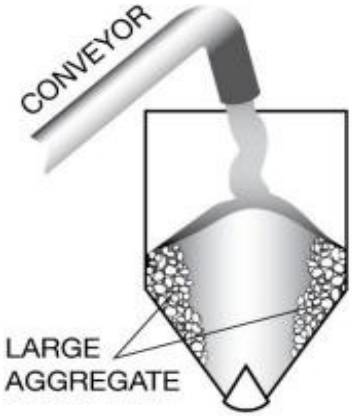
Fuente: Texas Department of Transportation

Figura 155. Ejemplo de segregación de media anchura de la carpeta

Una tercera razón es que la mezcla se cargó incorrectamente en el silo. Cuando la mezcla se deposita en el silo desde el dispositivo de transporte (transportadores de listones, transportador de banda o elevador de cangilones), la mezcla puede ser lanzada hacia un lado, causando que los agregados gruesos se separen de los materiales finos (ver Figura 156).

Cuando se vacía el silo, los agregados gruesos se depositan solo en un lado del camión. Este material segregado luego pasa por la pavimentadora y se observa en un solo lado de la mezcla después de la colocación. Además, si el camión no se carga en el centro de su ancho bajo el silo, puede ocurrir el rodamiento de los agregados gruesos y aparecer segregación longitudinal en un lado de la carpeta. La ilustración de la Figura 156 muestra la mezcla siendo transportada a una tolva de depósito (gob auger), lo que debería reducir la segregación, ya que deposita la mezcla en el silo por lotes.

Estos primeros cuatro tipos de segregación (al final del camión, en la línea central, en juntas y bordes, y de carpeta completa o media anchura) se originan durante las operaciones de transporte y pavimentación. El personal que trabaja en el sitio debe poder notar, reconocer y corregir estos tipos de segregación lo antes posible.



Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos
Figura 156. Segregación en el silo de la planta

10.2.5 Segregación Aleatoria

A diferencia de los cuatro ejemplos anteriores, la segregación aleatoria normalmente se origina en uno o varios puntos antes de las operaciones de transporte y pavimentación. Es más difícil de identificar en la carpeta debido a su aleatoriedad, en parte porque existen oportunidades de remezcla (ver Figura 157). Este es el tipo de segregación que la cuadrilla de pavimentación tiene poca o ninguna posibilidad de corregir. Las investigaciones sobre su ubicación y causa son más complejas e implican inspecciones que comienzan desde el manejo de agregados, pasando por la producción de la mezcla, su almacenamiento y el proceso de descarga. El nivel de severidad de esta segregación en la carpeta determinará si se requiere algún remedio y cuál sería. Las mezclas con agregado grueso, gap-graded y SMA son más propensas a este tipo de segregación.

Fuente: Departamento de Transporte de Iowa
Figura 157. Segregación aleatoria

Los bolsillos de roca segregada suelen ser causados por un manejo inadecuado de los agregados en las pilas de almacenamiento o en las tolvas de alimentación en frío, o por un almacenamiento incorrecto del HMA en la planta de asfalto.

Estos problemas se reducen cuando se utiliza una planta por lotes para producir la mezcla sin silo, ya que las cribas y las tolvas calientes en la planta recombinan cualquier material segregado antes de ser alimentado a la mezcladora continua. Además, esta mezcla todos los agregados y normalmente elimina cualquier segregación que pudiera haberse producido anteriormente. Sin embargo, si se utiliza un silo en una planta por lotes, la mezcla puede segregarse por las mismas razones que afectan a una mezcla producida en una planta de mezcla en tambor y pasada a través de un silo de almacenamiento o de reserva.

10.3 CUATRO ETAPAS DONDE PUEDE ORIGINARSE LA SEGREGACIÓN

La segregación ocurre más comúnmente en estas cuatro etapas:

Ver vídeo:
Segregación en la planta de asfalto

- Manejo y almacenamiento de agregados.
- Producción en la planta de asfalto.
- Operaciones de transporte.
- Operación de la pavimentadora.

La segregación causada por las operaciones de transporte y pavimentación generalmente puede ser detectada por la cuadrilla de pavimentación, el capataz o el inspector, y las correcciones pueden realizarse rápidamente. Por el contrario, la segregación causada por el manejo de agregados y la producción de la mezcla puede ser más compleja de identificar, y por lo tanto es posible que no se corrija el mismo día en que se detecta.

10.3.1 Manejo y Almacenamiento de Agregados

Las pilas de agregados se pueden construir correctamente, con mínima segregación, descargando el material desde los camiones por el extremo trasero para formar pilas de una sola capa. El desafío de este método es que requiere mucho espacio, ya que las pilas no son altas.

Se deben evitar pilas cónicas altas de agregados, porque las partículas más gruesas tienden a rodar por los costados de la pila. Se prefieren pilas construidas en capas o inclinaciones de material con pendientes menores al 30 %.

10.3.2 Producción en la Planta de Asfalto

Los problemas de segregación en la planta de asfalto están fuera del alcance de lo que la cuadrilla de pavimentación en el sitio puede resolver. Dada la complejidad de la planta de producción, los múltiples puntos donde puede ocurrir la segregación requieren una investigación exhaustiva por parte del personal de mantenimiento de la planta del contratista y, posiblemente, con la asistencia técnica del fabricante.

Una de las causas más comunes de segregación en la planta es la operación incorrecta del cargador, que puede contribuir significativamente a una segregación no uniforme y esporádica. Cargar las tolvas de alimentación en frío desde pilas de agregados segregadas, colocar el material incorrecto en la tolva equivocada, permitir que los agregados en la tolva formen puentes (deteniendo el flujo de esa tolva) o dejar que las tolvas se queden vacías, producirá segregación en la carpeta detrás de la pavimentadora.

Los siguientes son lugares adicionales en la planta de producción de mezcla que pueden necesitar ser revisados para asegurar un flujo uniforme de material a través de la planta:

- Tolvas frías
- Tolvas calientes
- Paletas de secador rotatorio
- Elevador caliente
- Sistemas de mezclador y compuertas
- Tolvas de amortiguación y almacenamiento
- Sistema de descarga

Equipo dañado o mal mantenido puede requerir reparación, fabricación o incluso actualización del equipo de planta.

10.3.3 Operación de Transporte en camiones

La segregación que ocurre debido a la carga y descarga del camión puede ser observada típicamente por el personal de campo y corregida rápidamente.

La mezcla asfáltica puede segregarse mientras se carga en los camiones desde el mezclador (pugmill), silo o sistemas de almacenamiento intermedio. Los camiones actuales son mucho más grandes, y se debe tener cuidado durante la carga para evitar la formación de conos dentro de la caja del camión.

Los mezcladores, silos y sistemas de almacenamiento intermedio tienen las mismas recomendaciones para la carga del camión. Deben hacerse al menos tres descargas de material en la caja: delantera, trasera y luego central (ver Figura 76 del Capítulo 6). Una sola descarga permite que las partículas gruesas se segreguen. Primero se debe colocar mezcla cerca del mamparo delantero para formar efecto de apilamiento en el frente y los lados. La segunda descarga produce el mismo efecto en la parte posterior del camión. La tercera descarga, al centro, debe superponerse con los lados cónicos de las dos primeras. Este procedimiento no elimina completamente la segregación, pero la distribuye y minimiza su efecto.

El método usado para descargar el camión en la tolva de la pavimentadora también puede contribuir a la segregación al generar pendientes largas por donde las partículas se separan durante el vaciado. La mayoría de estos problemas se debe a elevar la caja lentamente al descargar. Cuando el camión se ubica para vaciar en la tolva, la caja debe elevarse parcialmente antes de abrir la compuerta. Esto permite que la mezcla se mueva en masa e inunde la tolva, evitando que el agregado grueso caiga primero y genere patrones de segregación puntuales.

10.3.4 Operación de la pavimentadora

Ver vídeo:
Segregación en el lugar de trabajo

La operación de pavimentación es más que simplemente saber operar el equipo. Muchos errores en el manejo de la mezcla en la tolva, en el compartimento de los sinfines y en la operación de la regla pueden causar una segregación irrecuperable en la carpeta terminada. La causa de dicha segregación debe corregirse tan pronto como se observe. Si no puede identificarse la causa y la segregación persiste, la pavimentación debe detenerse.

En una operación de pavimentación ideal, la pavimentadora debería avanzar a una velocidad constante durante todo el día sin detenerse ni arrancar repetidamente. Sin embargo, algunas detenciones y arranques incidentales son inevitables. Cuando esto ocurre, tanto la segregación física como la térmica se minimizan realizando una parada firme con suficiente mezcla en la tolva y en la cámara de sinfines, y a la altura correcta de mezcla. Si se espera que la interrupción en la pavimentación sea demasiado prolongada (típicamente más de 30 minutos), deben aplicarse medidas similares a las del final de la jornada de pavimentación y crear una junta transversal.

Si ocurre segregación durante las operaciones de pavimentación, las siguientes son causas comunes.

Causas de segregación en la tolva:

- La tolva se deja vaciar por debajo de 1/3 de su capacidad.
- Las alas de la tolva se pliegan a intervalos frecuentes.
- Se permite que los transportadores de tablillas se queden sin mezcla y se hagan visibles.
- Las compuertas de flujo están mal ajustadas en relación con la velocidad de pavimentación.
- La mezcla derramada se devuelve a la tolva.

Causas de segregación en el compartimento de sinfines

- La mezcla no se mantiene a una altura constante ni al mismo nivel que el eje de los sinfines en todo el ancho de la regla (ver Figura 158).
- La altura de la mezcla difiere entre el lado izquierdo y el derecho.
- Si se pavimenta con mayor ancho, los sinfines y el túnel de confinamiento no se extienden lo suficiente hacia la compuerta final.
- Los sinfines no están colocados lo suficientemente altos para permitir el flujo inverso bajo la caja del sinfín.
- Los sinfines reversos cerca de la caja del sinfín no están presentes o no funcionan.
- La velocidad de rotación de los sinfines no está dentro de los límites aceptables.

Cualquiera de los problemas mencionados anteriormente tiene el potencial de causar segregación.

Fuente: Reway

Figura 158. Altura adecuada de mezcla en la caja de sinfines

La segregación continua generalmente puede atribuirse a las operaciones y al manejo del material en la pavimentadora. El espaciamiento regular de áreas segregadas suele estar relacionado con el final de cada carga.

10.4 SEGREGACIÓN TÉRMICA

La segregación térmica no es identificable sin monitoreo infrarrojo y, por lo tanto, a menudo pasa desapercibida. Al igual que la segregación física, hay muchos puntos donde puede originarse la segregación térmica. Este tipo de segregación ocurre con mayor frecuencia en los procedimientos de transporte y en la operación de la pavimentadora.

La segregación térmica no es identificable sin monitoreo infrarrojo y, por lo tanto, a menudo pasa desapercibida.

Durante el transporte, la mezcla se enfría más rápidamente en los bordes, el fondo y la parte superior del camión de acarreo. Este material más frío no siempre se remezcla con el material más caliente, lo que lleva a segregación térmica durante la colocación y la compactación. El resultado puede ser una mayor variabilidad en la densidad en sitio y una superficie no uniforme. Este problema solo puede detectarse mediante tecnología infrarroja. Las cajas de los camiones suelen aislarse para distancias de acarreo largas a fin de reducir el potencial de segregación térmica.

El uso de MTV (vehículos de transferencia de material) ha demostrado beneficios en la reducción de la segregación. El MTV remezcla la mezcla, reduciendo tanto la segregación física como la térmica. La segregación térmica puede minimizarse con una operación de pavimentación equilibrada e ininterrumpida.

Existen diversas maneras de detectar la segregación térmica. Estas van desde el uso de una "pistola" infrarroja portátil que realiza mediciones puntuales de la temperatura superficial hasta sistemas más automatizados. Estos sistemas automatizados pueden escanear todo el ancho de la carpeta, registrar temperaturas superficiales y ubicación, y enviar los resultados en tiempo real para su análisis (ver Figura 159). Esto permite tomar decisiones relacionadas con la operación de construcción y realizar correcciones oportunas si es necesario.

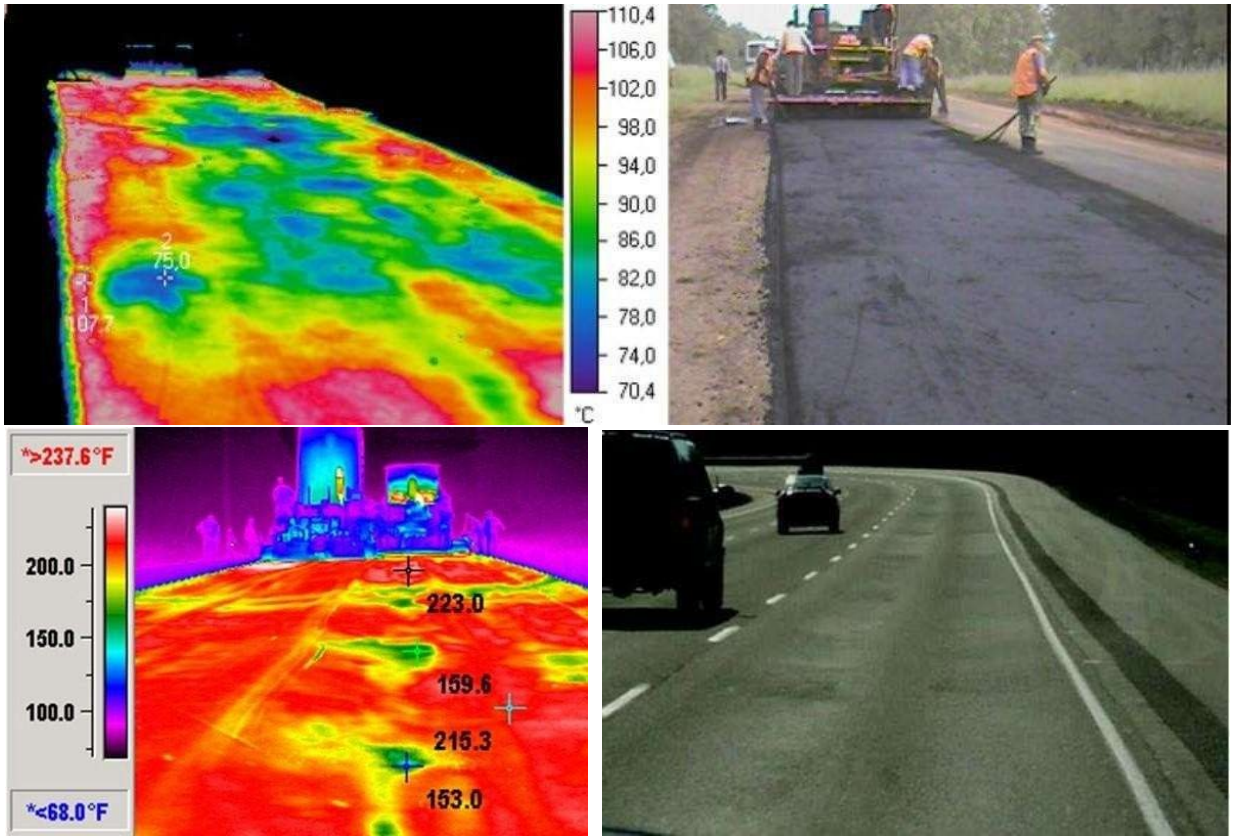
Fuente: VÖGELE

Figura 159. Pavimentadora equipada con un escáner infrarrojo automatizado

La investigación de Willoughby et al. (2001) concluyó que si la diferencia de temperatura de la mezcla es menor de 25 °F (~15 °C), puede esperarse una compactación generalmente consistente. Pero si la diferencia de temperatura es de 25 °F (~15 °C) o mayor, puede ocurrir compactación diferencial y el contenido de vacíos en sitio fluctuará.

Las áreas altamente segregadas con materiales gruesos tenderán a perder calor más rápido que las áreas circundantes de la carpeta recién colocada y aparecerán en las imágenes térmicas. La segregación térmica puede ser un indicador de la presencia de segregación física. Los datos infrarrojos pueden identificar puntos fríos en la carpeta y predecir áreas segregadas (ver Figura 160).

[1]K. Willoughby, J. Mahoney, L. Pierce, J. Uhlmeyer, K. Anderson, S. Read, ... R. Moore, Diferenciales de temperatura en pavimentos de concreto asfáltico relacionados con la construcción y los diferenciales de densidad correspondientes (Departamento de Transporte del Estado de Washington, 2001).



Fuente: Revista científica Dorogi i Mosti (arriba) and Pavimento interactivo (abajo)

Figura 160. Áreas segregadas (a la derecha) predichas por puntos fríos en imágenes infrarrojas

10.5 CONFIRMAR Y CUANTIFICAR SEGREGACIÓN

Identificar la presencia de segregación física puede ser, con demasiada frecuencia, subjetivo.

Lo ideal es reconocer la segregación mientras ocurre y realizar correcciones lo antes posible. Las áreas de segregación inaceptables deben ser reemplazadas como parte del contrato del proyecto durante la construcción.

La severidad de la segregación se clasifica en tres categorías generales:

- Leve — Área donde hay ligeramente más agregado grueso que en la mezcla aceptable circundante.
- Media — El área tiene significativamente más agregado grueso que la carpeta aceptable circundante y generalmente presenta ausencia de finos en la superficie.
- Severa — El área se ve muy gruesa en comparación con la carpeta circundante aceptable, con piedra contra piedra y pocos o ningún fino presente.

El trabajo suele suspenderse cuando se identifica segregación de nivel medio o severo. Esto permite al contratista abordar y tomar medidas correctivas para evitar mayor segregación en el proyecto.

Si el contratista y la agencia coinciden en que un área está significativamente segregada, la reparación, o incluso la remoción y reemplazo, suele realizarse rápidamente. Sin embargo, si existe desacuerdo respecto a la existencia, severidad y extensión de la segregación, un método para cuantificarla resulta útil para llegar a una resolución.

La segregación física y térmica hará que la mezcla quede fuera de las tolerancias para uno o varios de los requisitos de especificación. Comparar los resultados de ensayo del área segregada con el promedio, la desviación estándar y el rango de los resultados del resto del lote es una forma de cuantificar la segregación.

Los ensayos que pueden ayudar a identificar y cuantificar la segregación incluyen los siguientes:

- Lecturas de temperatura por infrarrojo (por escaneo).
- Lecturas de densidad (nuclear o de laboratorio).
- Contenido de ligante (extracción/horno de ignición).
- Granulometría del agregado (tras extracción del ligante/horno de ignición).
- Ensayo de permeabilidad (de campo o de laboratorio).
- Ensayo de parche de arena (ASTM E965).

Muchos de estos ensayos ya se realizan para la aceptación general de los lotes. También puede hacerse una comparación con las tolerancias del diseño de mezcla (JMF) aprobado.

El ensayo de permeabilidad puede realizarse con un permeámetro de carga variable de laboratorio o un permeámetro de campo.

Un núcleo tomado de un área visualmente segregada y gruesa en la carpeta (también conocida como “bolsillo de piedra”) tendrá naturalmente un menor contenido de ligante en comparación con un área que no está visualmente segregada.

Una serie de lecturas con un densímetro nuclear puede usarse para cuantificar la segregación. Típicamente, se toma un número específico de lecturas siguiendo un patrón establecido. Si el rango entre las lecturas excede los límites especificados, la carpeta se considera segregada en esa área.

11. Aseguramiento de calidad

11.1 INTRODUCCIÓN

Ver vídeos:
Pruebas comunes QA/QC
Porcentaje dentro de límites
Informe completo del lote

Las especificaciones de construcción de carreteras y aeródromos son un medio para un fin. Su objetivo es proporcionar al público viajero un pavimento adecuado y económico sobre el cual los vehículos y aeronaves puedan desplazarse de forma fácil y segura de un punto a otro. Una especificación práctica está diseñada para asegurar un desempeño adecuado al costo mínimo; una especificación realista toma en cuenta las variaciones en materiales y construcción que son inevitables y propias de la mejor construcción posible en la actualidad.

La mayoría de las agencias actualmente utiliza una combinación de especificaciones por método, especificaciones basadas en estadística y especificaciones por resultado final, todas las cuales se discutirán en la Sección 11.3. Esta combinación comparte el riesgo entre la agencia y el contratista, especificando directamente algunos materiales, equipos y métodos, pero permitiendo que el contratista elija otros también. Se define qué se considera “aceptable”, y mediante muestreo aleatorio y análisis estadístico de los resultados de ensayo se evalúa si el trabajo del contratista es aceptable.

Aunque se introducirán otros temas de aseguramiento de la calidad, el enfoque principal de este capítulo será sobre varios elementos del control de calidad (QC). Las siguientes subsecciones discutirán las definiciones de los aspectos principales de la calidad.

11.2 DEFINICIONES

11.2.1 Aseguramiento de calidad

La definición de QA ha evolucionado a lo largo de los años. Las definiciones anteriores describían QA principalmente como los métodos empleados por el propietario/agencia para asegurar que recibieran un producto de calidad, una definición ahora más cercana al término “aceptación”. Actualmente, dos documentos son referenciados para las definiciones en esta área: AASHTO R 10, “Definición de términos relacionados con calidad y estadística usados en la construcción de carreteras,” y TRB Circular E-C173, “Glosario de términos de aseguramiento de la calidad en construcción de transporte.” Las especificaciones para aeródromos, como la P-401 de la FAA y la UFGS 32 12 15.13 del Departamento de Defensa, utilizan la mayoría de los términos de manera equivalente a los documentos de AASHTO y TRB, pero no siempre.

AASHTO R 10 define QA como: “(1) Todas aquellas acciones planificadas y sistemáticas necesarias para proporcionar confianza de que un producto o instalación funcionará satisfactoriamente en servicio; o (2) asegurar que la calidad de un producto sea la que debe ser.” QA aborda el proceso general de obtener la calidad de un servicio, producto o instalación de la manera más eficiente, económica y satisfactoria posible. QA incluye los elementos de QC, aseguramiento independiente, aceptación, resolución de disputas, etc. QA implica una evaluación continua de las actividades de planificación, diseño, elaboración de planes y especificaciones, licitación y adjudicación de contratos, construcción y mantenimiento, y de las interacciones entre estas actividades.

11.2.2 Control de calidad

AASHTO R 10 define el QC como: “El sistema utilizado por un contratista para monitorear, evaluar y ajustar sus procesos de producción o colocación para garantizar que el producto final cumpla el nivel de calidad especificado.” El control de calidad incluye muestreo, ensayos, inspección y acciones correctivas (cuando se requieran) para mantener un control continuo del proceso de producción o colocación.” El QC también se conoce como “control del proceso”

Las agencias aeroportuarias como la FAA y el DoD generalmente utilizan mecanismos diferentes a los de los DOT para lograr el mismo objetivo de calidad.

Los aeródromos públicos y privados a menudo dependen del QC del contratista como una parte fundamental de su programa de QA, proporcionando pocos, si es que alguno, inspectores de la agencia. Esto no significa que no se realicen inspecciones o que la calidad se vea afectada. Las agencias de aeródromos como la FAA y el Departamento de Defensa generalmente dependen de mecanismos diferentes a los departamentos de transporte (DOTs) para lograr el mismo objetivo de calidad.

11.2.3 Aceptación

AASHTO R 10 define la aceptación como: “El proceso mediante el cual se evalúan todos los factores utilizados por la agencia (es decir, muestreo, ensayos e inspección) para determinar el grado de cumplimiento con los requisitos del contrato y determinar el valor correspondiente para un producto dado.”

Las mediciones del QC (muestreo, ensayos e inspección) pueden o no utilizarse en el proceso de decisión de aceptación. Cuando los resultados de ensayo del contratista se utilizan en la decisión de aceptación de la agencia, el proceso a menudo incluye verificación por parte de la agencia y/o mecanismos de resolución de disputas.

11.2.4 Resolución de las disputas

Los laboratorios de la agencia y del contratista a veces generan resultados de ensayo contradictorios. Es importante que las agencias que elaboran especificaciones definan un proceso para resolver los conflictos que puedan ocurrir. AASHTO R 10 define la resolución de disputas como: “El procedimiento utilizado para resolver conflictos resultantes de discrepancias entre los resultados de la agencia y del contratista de magnitud suficiente para afectar el pago.”

Como paso inicial, las agencias pueden simplemente revisar las declaraciones de precisión multilaboratorio en AASHTO y/o ASTM para ver si los resultados de ensayo están dentro del rango aceptable entre dos resultados. Un procedimiento de resolución de disputas también puede incluir el ensayo y comparación de muestras independientes. Las agencias pueden aplicar algún tipo de prueba estadística (prueba t) para determinar, en un conjunto de resultados, qué tan separados es demasiado separados. La prueba t independiente se utiliza para comparar las medias de dos conjuntos de datos obtenidos de manera independiente. La

prueba t pareada compara los resultados de ensayo de muestras divididas. Si las disputas no pueden resolverse entre la agencia y el contratista, el arbitraje de un tercero puede ser el paso final.

11.3 TIPOS GENERALES DE ESPECIFICACIONES

Las agencias necesitan algún método para comunicar sus expectativas al contratista. Las especificaciones forman parte del contrato y comunican los requisitos bajo los cuales un contratista debe entregar exitosamente un proyecto. Deben estar escritas claramente para que todas las partes puedan evaluar adecuadamente el grado de conformidad y lo que ocurre si el trabajo no cumple con las especificaciones.

11.3.1 Especificaciones por método

Las especificaciones por método (o especificaciones prescriptivas) fueron probablemente el tipo de especificación más utilizado en la construcción de carreteras y aeródromos hasta mediados de los años 1980. Con este tipo de especificación, la agencia indica al contratista que use métodos específicos, incluyendo materiales, proporciones, procesos y equipos. Si el contratista sigue los requisitos, la agencia acepta el trabajo finalizado y asume toda la responsabilidad por la calidad y el desempeño. Términos como “cumplimiento sustancial” y “conformidad razonablemente cercana” están asociados con las especificaciones por método.

Una ventaja de las especificaciones por método es que ofrecen un control extremo a la agencia cuando la experiencia sobre un producto o proceso particular está principalmente del lado de la agencia. También pueden ofrecer una ventaja cuando una medida de calidad es particularmente difícil de definir. La segregación de la mezcla asfáltica es uno de esos casos. La segregación es una característica indeseable (tratada en detalle en el Capítulo 10), pero el grado admisible de segregación es difícil de medir o especificar. Por lo tanto, las especificaciones por método pueden utilizarse para especificar lo que un contratista debe hacer para prevenir la segregación.

Sin embargo, las especificaciones por método también tienen varias desventajas. Los contratistas pueden no estar autorizados a usar los procedimientos más económicos o innovadores para producir el producto. La inspección correspondiente para garantizar la conformidad es intensiva en mano de obra. Si se mide la calidad del producto y se encuentra que es inferior a lo deseable, el contratista no tiene responsabilidad legal de mejorarla si se siguieron los métodos. Si se mide la calidad del producto y se encuentra que es inferior a lo deseable, el contratista no tiene responsabilidad legal de mejorarla si se siguieron los métodos.

La principal debilidad de este tipo de especificación es que no hay garantía de que producirá la calidad de construcción deseada. Lo más importante es que, al especificar explícitamente los materiales y procedimientos, el propietario o la agencia se obliga en gran medida a aceptar el producto final. Este tipo de especificación también es muy difícil de aplicar de manera uniforme. Los términos “conformidad razonablemente cercana” y “cumplimiento sustancial” no pueden definirse con precisión. En ausencia de un nivel de calidad claramente establecido y un medio uniforme para medir el cumplimiento, las decisiones pueden volverse arbitrarias y los procedimientos de aceptación pueden volverse inconsistentes en su aplicación.

11.3.2 Especificaciones por resultado final

La construcción del AASHO Road Test de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales (AASHO) en 1958 proporcionó el primer paso hacia las especificaciones por resultado final. Este tipo de especificación ofreció una forma de evaluar y cuantificar mejor la calidad de la construcción que el lenguaje impreciso como “conformidad razonablemente cercana”. Las especificaciones verdaderas por resultado final requieren que el contratista asuma toda la responsabilidad por producir y colocar un producto La responsabilidad de la agencia es aceptar o rechazar el producto final o aplicar un ajuste de pago que sea proporcional al grado de conformidad con las especificaciones.

Las especificaciones por resultado final tienen la ventaja de permitir al contratista flexibilidad para ejercer opciones de nuevos materiales, técnicas y procedimientos para mejorar la calidad y/o la economía del producto final.

Las especificaciones por resultado final típicamente hacen lo siguiente:

- Asignar al contratista total responsabilidad y libertad para determinar los procedimientos y equipos utilizados para producir el producto.
- Dejar el muestreo, ensayos e inspección del QC completamente a discreción del contratista o productor.
- Basar la aceptación de la agencia en el muestreo y los ensayos del producto final colocado.
- Determinar un ajuste de precio basado en el grado medido de conformidad con los criterios de la especificación.

Las especificaciones por resultado final enfatizan el muestreo y los ensayos del producto final, en lugar de la inspección, como la principal medida de aceptación de la agencia. Una gran cantidad de material puede resultar defectuosa después de haber sido colocada, cuando hay muy pocas oportunidades de corrección. Esto es riesgoso porque la agencia especificadora puede terminar aceptando cierta cantidad de producto no deseado. Debido a que solo se ensaya el producto final, esto también desalienta la acumulación de resultados de ensayo durante la construcción para obtener una imagen más representativa de la calidad del producto.

11.3.3 Especificaciones de Aseguramiento de Calidad

Las especificaciones de QA evolucionaron a partir de las complicaciones de las especificaciones por método y por resultado final. Este tipo de especificación es el más utilizado en la actualidad. AASHTO R10 las define como especificaciones que requieren QC del contratista y actividades de aceptación por parte de la agencia durante toda la producción y colocación del producto. La aceptación final del producto usualmente se basa en un muestreo estadístico del nivel de calidad medido para las características de calidad clave.

Las especificaciones de aseguramiento de la calidad (QA) surgieron a partir de las complicaciones de las especificaciones por método y por resultados finales. Este tipo de especificación es el más utilizado en la actualidad

Las responsabilidades de QC del contratista y de la agencia deben estar claramente definidas. Por parte del contratista, debe documentarse un plan de QC que identifique a todo el personal de QC y los procedimientos que se utilizarán para mantener los procesos de producción y colocación bajo control y cumplir con los requisitos de las especificaciones de la agencia. El plan también debe abordar las acciones correctivas que se tomarán si el proceso sale de control. Más información puede encontrarse en la Sección 11.4.

Otras áreas clave que deben documentarse en una especificación de QA incluyen las siguientes:

- Cómo se presentan los diseños de mezcla asfáltica y cómo se verifican.
- Cómo se verifica el desempeño en planta y en campo (por ejemplo, lotes de prueba, franjas de control).
- Cómo se utilizarán las pruebas e inspecciones de QC para monitorear el trabajo.
- Si los resultados de QC se utilizarán para la aceptación y de qué manera.
- Detalles sobre los procedimientos de inspección y aceptación de la agencia.

Como parte de las especificaciones de QA, las características de calidad del material que serán muestreadas, ensayadas e inspeccionadas para QC y para aceptación deben ser identificadas y claramente definidas. Por ejemplo, una especificación puede identificar la granulometría de la mezcla, contenido de ligante, espesor, VMA, vacíos de aire de laboratorio y vacíos de aire en sitio como características de calidad del contrato. Otras características que midan regularidad superficial, ranurado de pista, resistencia a roderas, resistencia al agrietamiento, etc., pueden incluirse dependiendo del tamaño del proyecto.

Otra información importante para incluir en una especificación de QA sería la ubicación del muestreo, los métodos de muestreo, los métodos de manejo de laboratorio y los métodos de ensayo que se utilizarán en las muestras. La frecuencia con la que debe muestrearse y ensayarse debe estar claramente definida, así como la forma y el destinatario de los informes de resultados. Las características de calidad seleccionadas deben estar relacionadas con el desempeño del producto y deben ser claramente medibles.

Debe especificarse la medida de calidad (MOQ) que se utilizará para la aceptación. La MOQ es cualquiera de varias herramientas matemáticas que se utilizan para cuantificar el nivel de calidad de una característica individual. Las MOQ comunes incluyen la media, la desviación estándar, la desviación absoluta promedio (AAD) y el porcentaje dentro de límites (PWL). AAD y PWL son dos de las MOQ más comunes.

11.3.3.1 Desviación absoluta promedio

Si una especificación solo exigiera que el promedio estuviera dentro de un cierto rango, los valores iniciales altos podrían compensarse posteriormente con valores bajos para llevar la media al rango objetivo. Lo mismo ocurriría con la desviación promedio, que incluiría si la desviación respecto al objetivo es positiva o negativa. Si bien usar la media o la desviación promedio puede ser valioso como herramientas de QC para monitorear tendencias, no son apropiadas para la aceptación.

La AAD utiliza la desviación absoluta de un resultado de prueba respecto al valor objetivo, sin considerar el signo. Una ventaja de la AAD es que resulta muy sencillo para cualquier técnico comprender la matemática necesaria para promediar las diferencias individuales de los valores de prueba respecto al objetivo, y así visualizar que la AAD indica, en promedio, cuánto se ha fallado en alcanzar la meta. Un valor bajo de AAD implica que los datos están cercanos al objetivo y presentan baja variabilidad.

Sin embargo, existen desventajas en el uso de la AAD. Al emplear desviaciones absolutas, la AAD no revela si las desviaciones son siempre bajas, siempre altas, o una mezcla de ambas. Un valor alto de AAD no significa necesariamente que haya baja precisión y baja exactitud. Es posible que los resultados sean muy precisos, pero poco exactos. Por lo tanto, la AAD no mide completamente la variabilidad. Además, para especificaciones de un solo lado como VMA, no existe un valor objetivo desde el que calcular la AAD, sino solo un mínimo.

Un índice similar, el Índice Conformal, mide la desviación al cuadrado respecto al objetivo. Aunque el Índice Conformal puede ser una mejor medida de la exactitud, presenta las mismas desventajas que la AAD.

11.3.3.2 Porcentaje dentro de los límites

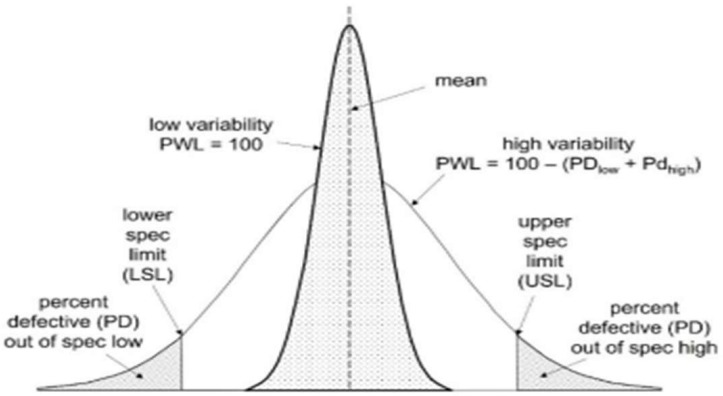
Para obtener precisión estadística pura, la medida de calidad operativa (MOQ) adoptada por la mayoría de las agencias

Ver Video:
Porcentaje dentro de límites

es el Porcentaje Dentro de los Límites (PWL). El PWL resulta ser más exigente que otras métricas de calidad. El procedimiento PWL se basa en la distribución normal, que es una distribución de probabilidad continua con forma de campana, definida por la media y la desviación estándar de la muestra. El área bajo la curva normal puede calcularse para determinar el porcentaje de la población que se encuentra dentro de ciertos límites.

La Figura 161 ilustra el concepto. Todos los datos están representados por el área bajo la curva. La figura muestra dos conjuntos de datos con la misma media situada en el valor objetivo; uno presenta baja variabilidad y la otra mayor variabilidad. El límite inferior fijado por la agencia aparece como límite inferior de especificación (LSL), y el límite superior fijado por la agencia aparece como límite superior de especificación (USL). Los datos de baja variabilidad, representados por un sombreado tenue, se sitúan completamente dentro de los límites de especificación (100 PWL) y recibirían el pago completo o incluso algún tipo de bonificación. Estos datos serían tanto precisos como exactos.

La curva más ancha, correspondiente a mayor variabilidad, promedia igual que la curva de baja variabilidad, pero exhibe mucha más dispersión. Contiene datos tanto por debajo del límite inferior de especificación como por encima del límite superior. Estas áreas pueden calcularse y se conocen como porcentaje de defectuosos (PD). El PWL para los datos de mayor variabilidad se calcularía como 100 menos (PD inferior + PD superior). Estos datos serían exactos, pero no precisos. La mayoría de las agencias permiten hasta 90 PWL (10 PD) para otorgar el 100% del pago.



Fuente: Instituto del asfalto

Figura 161. Porcentaje dentro de los límites

Ambos conjuntos de datos de la Figura 161 están centrados en el valor objetivo. Si, por ejemplo, el conjunto de datos presentara baja variabilidad, pero estuviera desviado hacia el lado bajo, la curva se desplazaría a la izquierda. Si el promedio de los datos fuera lo suficientemente bajo, existiría cierto porcentaje de defectuosos (PD) en el lado bajo, pero ninguno en el lado alto debido a la baja variabilidad de los datos. En este ejemplo, los datos serían precisos, pero no exactos.

Aunque el PWL no resulta tan sencillo de comprender y calcular para los técnicos como el AAD, ofrece varias ventajas. Es más exigente desde el punto de vista estadístico que otras medidas de calidad operativa (MOQ). Integra de manera eficiente la media y la desviación estándar de los datos en una sola medida. Al igual que otras especificaciones de control de calidad, el PWL fomenta la uniformidad. La uniformidad constituye un predictor comprobado del desempeño.

11.3.4 Especificaciones de rendimiento

Muchas agencias están avanzando hacia el uso de especificaciones de rendimiento. La norma AASHTO R 10 define estas especificaciones como aquellas que describen cómo debe comportarse el producto terminado a lo largo del tiempo. Aunque existen varios tipos de especificaciones de rendimiento, a menudo se piensa en las garantías cuando se habla de ellas. En una especificación por garantía, el contratista asume todo el riesgo relacionado con el desempeño del pavimento e incorpora todas las actividades de mantenimiento necesarias para mantener el nivel de servicio especificado.

A continuación, se mencionan las limitaciones del uso de especificaciones por garantía:

- Requieren monitoreo a largo plazo, con las necesidades administrativas asociadas.
- Es necesario distinguir entre problemas relacionados con el diseño y problemas relacionados con la construcción.
- Normalmente están sujetos a una capacidad de fianza reducida.

Debido a los riesgos asociados con las incertidumbres futuras, las compañías de fianzas normalmente no están dispuestas a ofrecer garantías a los contratistas por más de 5 años. Esto incrementa el costo total del proyecto para la agencia.

Otras dos categorías de especificaciones que se incluyen dentro del concepto de especificaciones de rendimiento son las especificaciones relacionadas con el rendimiento y las especificaciones basadas en el rendimiento.

Las especificaciones relacionadas con el rendimiento describen los niveles deseados de características clave en los materiales y la calidad de la construcción que, bajo condiciones claramente definidas, se ha comprobado que correlacionan con propiedades ingenieriles fundamentales que predicen el comportamiento. Estas características, como por ejemplo el contenido de vacíos de aire, suelen ser aptas para pruebas de aceptación en el momento de la construcción.

Las especificaciones basadas en el rendimiento describen los niveles deseados de propiedades ingenieriles fundamentales (por ejemplo, módulo resiliente, propiedades de fluencia y fatiga) que son indicadores del comportamiento y se utilizan en relaciones primarias de predicción. Estos modelos permiten predecir tensiones, daños o desempeño a partir de combinaciones de variables predictoras que representan tránsito, ambiente, materiales de soporte y condiciones estructurales. Generalmente, la mayoría de las propiedades ingenieriles fundamentales no son aptas para pruebas de aceptación oportunas.

11.4 PLAN DE CONTROL DE CALIDAD

Alguna forma de control de calidad (QC) o control de proceso se implementa durante la producción de todas las mezclas asfálticas. Existen dos aspectos clave en las pruebas de QC. El primero consiste en medir características específicas e inspeccionar aquellas actividades que afectan la calidad del producto terminado. El segundo aspecto es proporcionar los resultados de dichas mediciones e inspecciones de manera significativa y oportuna, permitiendo realizar ajustes durante el proceso de producción. Así, los ajustes posteriores o acciones correctivas pueden minimizar la incorporación de materiales no conformes en el producto final.

La cantidad de datos de QC y el nivel de control varían considerablemente de un proyecto a otro. Algunas especificaciones exigen que el contratista lleve un control exhaustivo y establecen pruebas específicas y frecuencias de ensayo. Otras especificaciones permiten que el contratista o el proveedor determine el nivel de pruebas en función de su propio criterio sobre los datos necesarios para controlar adecuadamente el proceso de producción.

Existen dos aspectos clave en las pruebas de control de calidad. El primero consiste en medir características específicas e inspeccionar aquellas actividades que afectan la calidad del producto terminado. El segundo aspecto es proporcionar los resultados de dichas mediciones e inspecciones de manera significativa y oportuna, lo que permite realizar ajustes durante el proceso de producción.

11.4.1 Selección de los métodos de muestreo y la frecuencia de muestreo

Ver vídeo:
Procedimientos de muestreo

Los métodos y lugares de muestreo pueden influir significativamente en el resultado de los parámetros que se para QC. Por lo tanto, el muestreo es un aspecto importante del programa general de QC.

Los métodos y frecuencias seleccionados para el muestreo no siempre son los mismos para QC que para la aceptación. Los métodos de muestreo utilizados para determinar la gradación del agregado son un ejemplo. Algunos contratistas utilizan métodos de muestreo con cinta transportadora en frío para comprobar la gradación del agregado con fines QC. Estas muestras se toman en la planta mezcladora de asfalto y pueden proporcionar resultados de las pruebas en cuestión de horas tras el muestreo. Estos resultados QC permiten realizar los ajustes necesarios a lo largo del día.

Los resultados de la aceptación deben comunicarse al contratista a tiempo para que pueda realizar los ajustes necesarios, normalmente en un plazo de 24 horas. Sin embargo, en ocasiones es posible que no se reciban hasta varios días después de la colocación, lo que podría provocar que varios días de mezcla se colocaran fuera de las especificaciones. El tiempo necesario para obtener los resultados es un factor importante en la selección de los métodos de muestreo durante la producción.

11.4.2 Selección de los métodos de ensayo

Ver vídeo:
Pruebas de laboratorio comunes QA/QC

Tradicionalmente, el control de la producción de la mezcla determinadas exclusivamente por el contenido de ligante y la gradación de los áridos. A medida que mejoraban las pruebas QC durante la producción de la mezcla y avanzaba el conocimiento técnico de los factores volumétricos que afectan a la longevidad de los pavimentos asfálticos, se ha ido prestando cada vez más atención al control de estas propiedades en la mezcla. La mayoría de los organismos incluyen ahora pruebas volumétricas de la mezcla en sus requisitos tanto para QC como para la aceptación.

Para predecir la durabilidad a largo plazo, algunas agencias están incluyendo ahora pruebas de rendimiento en sus criterios de aceptación o QA. La filosofía del diseño de mezcla equilibrada (como se explica en el capítulo 3) combina las pruebas de rendimiento y las pruebas de mezcla tradicionales para mejorar la capacidad de la mezcla de rendir a lo largo del tiempo.

Según la síntesis 346 del NCHRP «Programas estatales de garantía de calidad en la construcción», la mayoría de los departamentos de transporte estatales de los Estados Unidos seleccionan métodos específicos de muestreo y ensayo que deben utilizarse como mínimo para el QC en sus proyectos. Estos requisitos de ensayo suelen identificarse en las especificaciones estándar. Muchas agencias incluyen partidas QC en las licitaciones para reembolsar a los contratistas los costes asociados a la realización de los ensayos. El informe de síntesis identificó los siguientes parámetros que pueden ser necesarios para los programas de ensayo QC:

- Contenido de ligante asfáltico.
- Gradación de los áridos.
- Compactación.
- Propiedades volumétricas (huecos de aire, VMA, VFA).
- Calidad de rodadura.
- Características de los áridos (angularidad de los áridos gruesos, angularidad de los áridos finos, y alargadas, equivalente de arena, etc.).
- Espesor del pavimento.

Muchos de los valores de las pruebas se comparan con el JMF. Cuando ese es el caso, se deben utilizar para QC las mismas pruebas que se utilizaron en el desarrollo del JMF. No sería aconsejable, por ejemplo, utilizar valores de densidad Marshall para evaluar los huecos de aire en mezclas que se diseñaron utilizando Superpave.

En el caso de los ensayos que no se comparan con el JMF, los métodos de ensayo seleccionados para fines de QC pueden ser diferentes de los métodos de ensayo utilizados para la aceptación del mismo parámetro. Por ejemplo, los ensayos de QC suelen utilizar medidores de densidad nucleares o no nucleares para dar una indicación de la densidad de la carretera durante las operaciones de rodadura. Las agencias suelen exigir que se extraigan núcleos del pavimento acabado para la aceptación final de la densidad. Los resultados de las pruebas de los núcleos llegan demasiado tarde para ser utilizados en el ajuste de la operación de compactación en tiempo real, ya que el asfalto ya se ha enfriado. Las lecturas del medidor de densidad se pueden tomar mientras la mezcla aún está caliente y la operación de compactación está en curso. Por lo tanto, los resultados de las pruebas con medidores pueden ser una parte importante del programa general QC para la compactación del asfalto.

Dado que los métodos QC deben hacer hincapié en la rapidez y la comodidad, los resultados pueden ser menos precisos y más variables. Si el método de prueba QC es diferente al método de aceptación, se debe prever un pequeño cambio en los datos. Por ejemplo, no sería razonable detener las operaciones de compactación cuando se lee un 92,6 % de compactación en un medidor de densidad nuclear si la compactación mínima requerida es del 93 % utilizando densidades de núcleo. Se podría establecer un objetivo más alto para tener en cuenta la posible variación y el posible cambio de los valores de compactación del método de densidad nuclear al método de densidad del núcleo. También es una medida QC prudente correlacionar los métodos de prueba QC y los laboratorios con los métodos de aceptación realizados por el laboratorio de aceptación. Esto se puede lograr comparando las lecturas del medidor con las densidades del núcleo obtenidas en los mismos lugares a partir de una tira de prueba o al comienzo de la producción de la mezcla.

Si se utiliza un medidor para controlar la densidad, se debe establecer una correlación precisa con las densidades del núcleo. Para cada medidor de densidad, es razonable esperar un valor de compensación coherente entre la lectura del medidor y la obtenida del núcleo. La mayoría de las agencias han establecido métodos para correlacionar los valores del medidor con los del núcleo.

11.4.3 Plan de control de calidad por escrito

Ver vídeo:
Informe completo del lote

La mayoría de las agencias que especifican el muestreo y las pruebas QC en sus proyectos también exigen que el contratista presente un «plan de control de calidad» antes de comenzar las operaciones de pavimentación. Los requisitos de estos planes pueden ser muy amplios y, por lo general, implican algo más que planes de muestreo y ensayo. Por lo general, exigirán documentación que verifique el cumplimiento de determinados requisitos del proyecto relacionados con el programa de control de calidad. La síntesis 346 del NCHRP indica que, por lo general, se exigen los siguientes elementos como parte de los planes de control de calidad escritos para la producción de mezclas en planta:

- Matriz de responsabilidad que muestra quién es responsable de revisar los resultados de QC y dirigir cualquier acción correctiva.
- Plan de muestreo y pruebas que identifica las pruebas específicas y las frecuencias que se utilizarán para el proyecto.
- Documentación que demuestre que la planta cumple con las calificaciones, certificaciones y frecuencias de inspección requeridas.
- Documentación que demuestre que el laboratorio que realizará las pruebas QC cumple con las calificaciones y acreditaciones requeridas.
- Documentación del equipo que contiene el laboratorio y cualquier certificación de calibración que pueda ser necesaria.
- Documentación que demuestre que los técnicos que realizarán el muestreo y las pruebas cumplen con las cualificaciones y certificaciones requeridas.
- Formularios de informe de ejemplo, incluyendo gráficos de control que resumen ciertos datos clave en gráficos que pueden mostrar rápidamente las tendencias que requieren atención. Procedimientos escritos que describen los criterios que se utilizarán para identificar la producción «fuera de control», las medidas que se tomarán cuando los materiales no cumplan esos criterios y el calendario o los plazos de dichas medidas.

En la Tabla 10 se presenta un ejemplo de plan de muestreo y ensayo que formaría parte del plan QC para la producción de mezclas, en el que se muestran los métodos ASTM y AASHTO. Los métodos no son intercambiables porque no siempre son los mismos. Por lo tanto, las especificaciones estándar deben designar el método que se debe seguir.

Tabla 10. Ejemplo de plan de muestreo y ensayo QC

Parámetro de ensayo	Punto de muestreo / método	Método de ensayo, AASHTO	Método de ensayo, ASTM	Frecuencia de muestreo	Cantidad estimada	ensayos
Gradación de los aridos	Correa de alimentación en frío, ASTM D 75	T 27, T 11	C 136, C 117	1000 toneladas (907 toneladas)	28 000 toneladas (25 400 toneladas)	28
Angularidad de aridos finos	Cinta transportadora en frío, ASTM D 75	T 304	C 1252	Cada día	7 días	7
Contenido de asfalto	Planta o camión, ASTM D 140	T 308	D 6307	1000 toneladas (907 toneladas)	28 000 toneladas (25 400 toneladas)	28
Espacios de aire de laboratorio	Planta o camión, ASTM D 140	T 312, T 166, T 209, T 269	D 4013, D 2726, D 2041, D 3203	1000 toneladas (907 toneladas)	28 000 toneladas (25 400 toneladas)	28
Compactación	Superficie del pavimento		D 2950	1000 pies (305 m) por cada carril de pavimentación carril	53 000 pies (16 154 m)	53
Espesor del pavimento	Pavimento Superficie, por muestreo		D 3549	1000 pies (305 m) por carril de pavimentación	53 000 pies (16 154 m)	53
Calidad de conducción Suavidad	Superficie del pavimento	Regla de 3 m (10 pies) (véanse las especificaciones)	Regla de 3 m (10 pies) (véanse la especificación)	50 pies (15 m)	53 000 pies (16 154 m)	1060

Fuente: Instituto del Asfalto

Una vez adjudicado el proyecto, el plan QC por escrito se suele enviar al propietario para su revisión y aprobación. El plan se suele enviar junto con otros documentos del proyecto relacionados con la producción de la mezcla, como los diseños de las mezclas asfálticas que se utilizarán en el proyecto, las pruebas de calificación de la *Fuente* de áridos, las certificaciones de los materiales comerciales que se incorporarán a la mezcla, la designación de la planta o plantas que se utilizarán para la producción y los planes de pavimentación.

11.5 MÉTODOS DE MUESTREO

Ver Videos: *Procedimientos de muestreo*

Los métodos utilizados para el muestreo de la mezcla asfáltica pueden tener un efecto significativo en el resultado de los ensayos. Si una muestra es

no representativa del material, no tiene sentido continuar con el programa de pruebas. Deben seguirse técnicas de muestreo adecuadas y procedimientos específicos para obtener una representación precisa de los materiales que se producen.

11.5.1 Muestreo representativo

Un objetivo principal es obtener muestras que sean representativas de los productos que se están evaluando. Dado que los resultados de las pruebas se utilizan para ajustar la producción de la mezcla, sería contraproducente realizar ajustes en la planta basándose en una muestra

Las muestras representativas son fundamentales para que los programas de QC y aceptación sean eficaces. La inspección es más adecuada para identificar partes no uniformes del trabajo. Una vez que la inspección ha identificado una parte del trabajo que no es uniforme (diferente del resto del trabajo) o se sospecha que hay materiales defectuosos, se deben tomar muestras adicionales que representen ese elemento específico del trabajo. Los resultados de las pruebas de dichas muestras nunca deben utilizarse como parte de los promedios del lote, y mucho menos para la aceptación del lote. Solo representan las áreas problemáticas específicas identificadas por la inspección. Las especificaciones estándar deben ofrecer orientación sobre cómo manejar las áreas sospechosas.

Es importante recoger suficiente material al tomar muestras. El tamaño de la muestra es importante no solo para obtener suficiente material para completar las pruebas requeridas, sino también para lograr una muestra representativa. La mayoría de las normas indican un requisito mínimo de tamaño de muestra.

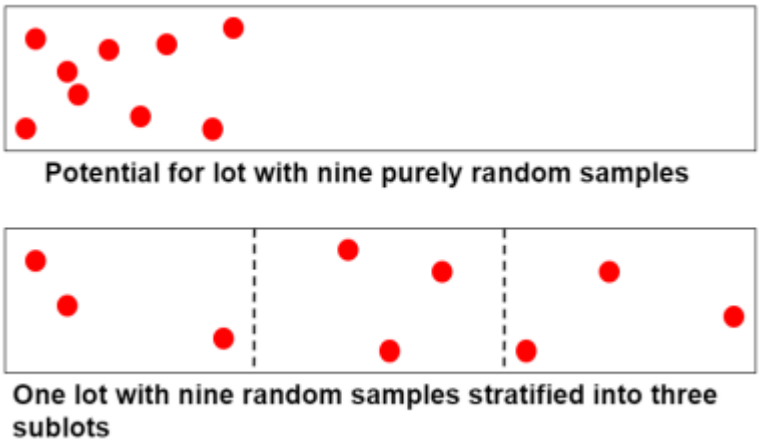
La cantidad de mezcla asfáltica producida en un proyecto determinado suele dividirse en porciones predefinidas denominadas «lotes». Los planes QA y QC suelen exigir que se tomen muestras a intervalos dentro de estos lotes. Los intervalos se miden generalmente de una de las tres formas siguientes:

1. **Intervalos de tiempo**— los tamaños típicos de los lotes cuando se toma una muestra por intervalo de tiempo incluirían la producción de medio día o la producción de un día completo.
2. **Intervalos de cantidad**— los tamaños típicos de los lotes cuando se toma una muestra por intervalo de cantidad incluirían 5000 o 10 000 toneladas, dependiendo de las tasas de producción previstas.
3. **Intervalos de distancia**— tamaños típicos de los lotes basados en pies lineales (metros) de pavimentación. Por ejemplo, las muestras se suelen tomar en función de una distancia lineal relativa al posicionamiento (una longitud de 100 pies [o 100 o 1000 m] a lo largo de una ruta de inspección) y un desplazamiento desde una línea longitudinal fija.

El tamaño de los lotes se establece normalmente mediante especificaciones estándar, definidas con suficiente antelación a la construcción. El tamaño y el método de medición de un lote se utilizarán para determinar las ubicaciones y cantidades de QC y las pruebas de aceptación. El lote también se utilizará para definir qué parte del trabajo representa un conjunto determinado de resultados de pruebas. Los límites del lote son especialmente significativos si se requiere una acción correctiva o una eliminación.

11.5.2 Muestreo aleatorio

El uso de técnicas de muestreo aleatorio ayuda a obtener muestras representativas e imparciales, en las que cada elemento de la población tiene las mismas posibilidades de ser seleccionado para el muestreo. Como se muestra en la figura 162, es teóricamente posible que los números puramente aleatorios requieran que todas las muestras de todo el proyecto se tomen en un área muy pequeña. El método mejor y más práctico para garantizar que las muestras incluyan toda la gama de construcciones es un proceso denominado muestreo aleatorio estratificado. Esta práctica separa los lotes en sublotes de igual tamaño, de los que se obtienen muestras aleatorias. La norma ASTM D3665 establece la práctica estándar para el muestreo aleatorio de materiales de construcción.



Fuente: Instituto del asfalto

Figura 162. Muestreo puramente aleatorio frente a muestreo aleatorio estratificado

El muestreo aleatorio estratificado se puede aplicar a diferentes tipos de intervalos tomando el número de muestras necesarias y distribuyéndolas por tiempo, cantidad o ubicación.

Ver vídeo: *Extracción de núcleos*

La extracción de muestras del pavimento es una de las formas más importantes de verificar que la construcción del asfalto cumple con las especificaciones. Las muestras proporcionan evidencia directa del espesor, la densidad y la calidad general, información que no se puede confirmar completamente solo con mediciones de la superficie. Este vídeo muestra paso a paso todo el proceso: cómo determinar el número adecuado de muestras, cómo seleccionar ubicaciones aleatorias para evitar sesgos y cómo manejar correctamente el equipo de extracción de muestras con broca de diamante. También incluye las mejores prácticas para extraer, etiquetar y manipular las muestras, con el fin de garantizar la precisión de los resultados de las pruebas. En conjunto, estos pasos ayudan a las agencias y a los contratistas a confirmar el rendimiento, documentar el cumplimiento y generar confianza en que el pavimento terminado resistirá el paso del tiempo.

La tabla 11 ilustra cómo calcular el tonelaje de muestreo aleatorio para muestras de asfalto suelto de las plataformas de los camiones. El ejemplo es para un proyecto con lotes de 4000 toneladas y sublotes de 1000 toneladas. Los números aleatorios se pueden generar fácilmente por ordenador. En el ejemplo, el número aleatorio se aplica solo a la cantidad del sublote y, a continuación, se calcula la cantidad acumulada. Para el sublote 3, recuerde que ya se han producido 2000 toneladas en los sublotes 1 y 2. Por lo tanto, el tonelaje aleatorio dentro del sublote 3 (263,7) se suma a las 2000 toneladas, y se toma una muestra del camión que contiene la tonelada 2263,7.

Tabla 11. Ejemplo de muestreo aleatorio por tonelaje Tabla

Lote-Sublote	N.ºaleatorio	Toneladas/sublote	N.º de toneladas de la muestra en camión	Acumulativo N.º de muestra en toneladas
1 - 1	0,7101	1000	710,1	710,1
1 - 2	0,9632	1000	963,2	1963,2
1 - 3	0,2637	1000	263,7	2263,7
1 - 4	0,3199	1000	319,9	3319,9
2 - 1	0,8711	1000	871,1	4871,1

Fuente: Instituto del Asfalto

El ejemplo anterior presenta un muestreo basado en incrementos de cantidad. Son útiles para planificar muestras aleatorias de mezclas sueltas durante la producción en planta. Estos mismos métodos y soluciones de hojas de cálculo podrían aplicarse si las muestras se obtuvieran en función de la ubicación. Por ejemplo, los incrementos de muestreo para la extracción de muestras de carreteras se planificarían tanto en una estación determinada como a una distancia de la línea central. Los números aleatorios podrían generarse por hora si los lotes se evaluaran por intervalos de medio día o un día.

11.5.3 Muestreo de mezclas asfálticas

Ver vídeo:
Procedimientos de muestreo

Los requisitos de muestreo suelen ser establecidos por la agencia y deben identificarse en el plan QC escrito del contratista. El muestreo de aceptación suele ser realizado por el contratista, pero debe ser presenciado por personal de la agencia. El personal de la agencia suele tomar posesión de las muestras inmediatamente después de su obtención. Es importante que todas las muestras se documenten adecuadamente con, como mínimo, el número de proyecto, la fecha de muestreo, el tipo de material y la ubicación del muestreo (número de lote y/o sublote).

La agencia también puede solicitar otra información identificativa.

Existen métodos de muestreo para tomar muestras de la mezcla de la planta en muchos puntos a lo largo del proceso de construcción, incluyendo en la planta, en los camiones de reparto, en las hileras en la obra y detrás de la máquina pavimentadora. Algunas agencias pueden requerir un punto de muestreo para QC y un punto de muestreo diferente para la aceptación.

Para estos métodos de muestreo, se deben seguir los procedimientos descritos en AASHTO R 97 o ASTM D979. Los especificadores deben considerar cuidadosamente la ubicación del muestreo. Cada ubicación de muestreo permitida en estas normas tiene ventajas y desventajas relacionadas con la probabilidad de obtener una muestra representativa, la probabilidad de causar defectos permanentes en la nueva capa y la seguridad relativa del técnico durante el muestreo.

Las muestras de la mezcla compactada de la planta también se pueden tomar cortando núcleos del pavimento enfriado siguiendo los métodos descritos en ASTM D5361 o AASHTO R 67. A continuación se presenta una breve descripción de cada ubicación preferida para el.

11.5.3.1 Muestreo en la planta

Algunas plantas mezcladoras de asfalto están equipadas con dispositivos de muestreo para obtener muestras antes de entregarlas a las unidades de transporte. Estos dispositivos suelen incluir un recipiente de muestreo que atraviesa perpendicularmente todo el flujo de la mezcla de asfalto, o pueden incluir un dispositivo de muestreo que desvía todo el flujo hacia un recipiente de muestreo. Es importante que 1) se muestree todo el flujo y 2) el recipiente de muestreo no se llene en exceso durante el muestreo y se derrame por los bordes, perdiendo parte de la muestra.

11.5.3.2 Muestreo desde camiones

Las técnicas de muestreo en camiones se utilizan para obtener muestras de la mezcla de la planta. Muy a menudo, las muestras se toman inmediatamente después de la carga en la planta, donde las plataformas de muestreo permiten a los técnicos situarse a la altura de la plataforma del camión. La plataforma del camión se divide visualmente en tres o cuatro secciones iguales, y se toma una muestra de cada sección. Se retiran los 15 a 30 cm superiores (0,15 a 0,3 m) de material antes de tomar la muestra de la zona expuesta.

11.5.3.3 Muestreo desde cordones de mezcla

También se pueden tomar muestras representativas de la pila de una unidad de transporte, evitando el principio o el final de la sección de la pila. La pila se divide visualmente en tres secciones aproximadamente iguales y se retira la parte superior de 1 pie (0,3 m) de la pila antes de tomar la muestra. La mezcla puede segregarse en la pila, por lo que se debe tener cuidado al utilizar la muestra como QC para los ajustes de la planta.

11.5.3.4 Muestreo de mezcla suelta colocada in situ

Se pueden obtener muestras representativas de la mezcla de plantas mediante el muestreo detrás de la máquina pavimentadora. Estas muestras se toman inmediatamente después de la colocación, pero antes de que se produzca cualquier compactación. El uso de placas puede ayudar a obtener una muestra completa, pero cualquier método debe incluir toda la profundidad del material. Los agujeros de donde se obtuvo la muestra deben rellenarse antes de que llegue el rodillo. La mezcla puede segregarse en los sinfines de la pavimentadora, por lo que se debe tener cuidado al utilizar la muestra como QC para los ajustes de la planta.

11.5.3.5 Muestreo de mezcla compactada in situ

El muestreo con saca testigos es el método más habitual para los pavimentos asfálticos compactados. Las perforadoras eléctricas portátiles con saca testigos de corte húmedo con puntas de diamante permiten una extracción rápida con poco o ningún daño a las muestras. Estas muestras se utilizan normalmente para evaluar la compactación y el espesor.

Una vez retiradas del pavimento, las muestras de ensayo deben manipularse con cuidado, ya que pueden ser sensibles al daño causado por el calor, los impactos y las cargas puntuales. Para proteger las muestras, algunos planes QC requieren contenedores de transporte acolchados y especialmente diseñados. Es muy importante asegurarse de que los agujeros de los núcleos se rellenen y compacten adecuadamente.

11.6 CONTROL DE CALIDAD EN LA PLANTA

Todo contratista de asfalto exitoso controla la calidad de la mezcla de asfalto a lo largo de todo el proceso de producción. La planta en sí debe calibrarse/verificarse para garantizar su correcto funcionamiento, tal y como se explica en el capítulo 4. Todos los mecanismos de pesaje deben certificarse periódicamente para garantizar su precisión. Las cintas transportadoras y las aberturas de las compuertas deben ajustarse correctamente para garantizar un flujo uniforme del material. Los tanques de aglutinante deben mantenerse para garantizar una circulación, una uniformidad de temperatura y un flujo adecuados. Las emisiones deben cumplir con la normativa medioambiental local y ajustarse para garantizar el retorno adecuado de las partículas finas a la mezcla. Todos los tanques y alimentadores auxiliares deben mantenerse y gestionarse constantemente. Las siguientes secciones proporcionan más consideraciones sobre el control de la mezcla y los materiales componentes.

11.6.1 Control de plantas de áridos

Las cualidades de diseño son la consideración principal a la hora de seleccionar los áridos para un JMF. La decisión sobre qué árido utilizar se basa en los datos de las pruebas de laboratorio y en la economía de la mezcla, mucho antes de que el material llegue a la planta de producción de la mezcla (las características generales y las propiedades físicas de los áridos para las capas superficiales y de base se trataron en el capítulo 3). Los áridos en bruto deben proceder de *Fuente*s aprobadas por la agencia y deben almacenarse (normalmente en pilas) y someterse a pruebas para comprobar que cumplen las normas de calidad designadas.

11.6.2 Control de plantas de ligantes asfálticos

Los ligantes asfálticos se suelen adquirir de un proveedor probado y aceptado por la agencia, o bien se aceptan basándose en la certificación del proveedor o en las pruebas realizadas por la agencia. El coste y las preferencias locales influirán en la selección del proveedor. En muchas zonas, el contrato de compra con el proveedor de asfalto exige la certificación de los resultados de las pruebas realizadas a una tirada de producción de material o a un lote identificable de material. Los estrictos procedimientos QC también pueden exigir que el transportista que suministra el material a la planta presente un
«certificado de carga previa», que protege al proveedor de la carga de disputas derivadas de la contaminación durante el transporte. Estos requisitos deben especificarse al formalizar el contrato de compra.

Las pruebas del asfalto rara vez las hace el personal de la planta QC. Es buena idea tomar muestras al azar de las cargas de ligante asfáltico que llegan para hacer pruebas en el futuro si es necesario. La agencia también puede tomar muestras del ligante asfáltico en la planta y hacer pruebas en el laboratorio de la agencia. En este caso, las muestras guardadas en el lugar son útiles si surge alguna duda sobre la calidad del ligante asfáltico.

Los proveedores de asfalto suelen tener programas QC muy sólidos y bien documentados. La calidad del aglutinante en la puerta es el estándar esperado. Sin embargo, incluso si el aglutinante en sí cumple con las especificaciones, los operadores de la planta deben asegurarse de que están recibiendo los grados adecuados y almacenándolos en los tanques adecuados, sin contaminación. Si se utiliza un aglutinante incorrecto, las propiedades de la mezcla y las características de colocación cambiarán. Técnicos y agencia QC

Los inspectores deben verificar periódicamente las facturas de compra y los certificados de pruebas presentados por el proveedor de asfalto para garantizar que se utilice el aglutinante adecuado en el proyecto.

La temperatura del ligante asfáltico entrante debe controlarse de cerca. Las especificaciones establecen límites para la temperatura permitida en los tanques de almacenamiento de asfalto. El sobrecalentamiento por parte del proveedor o transportista es motivo de rechazo del ligante asfáltico.

11.6.3 Control de la planta de mezclas asfálticas

El control de las mezclas en planta incluye una serie de elementos tan estrechamente relacionados entre sí que resulta difícil separarlos. Una prueba puede realizar diversas funciones, satisfaciendo varias de estas necesidades de QC. El control diario de la planta que requiere pruebas de QC es el siguiente:

- Gradaciones de las reservas o de la alimentación en frío.
- Gradaciones de silos calientes (para plantas por lotes).
- Ajustes de alimentación en frío.
- Ajustes de peso en silos calientes (para plantas por lotes).
- Pruebas de contenido de asfalto.
- Gradación de los áridos en la mezcla.
- Ajustes del tiempo y la temperatura de mezcla.
- Preparación de muestras compactadas para realizar las siguientes pruebas:
    - Huecos.
    - VMA.
    - VFA.
    - Densidad.
    - Fluidez (solo Marshall).

11.6.4 Lotes de prueba

Incluso con un diseño de mezcla aprobado, algunas especificaciones de la agencia exigirán al contratista que produzca un lote de prueba de la mezcla varios días antes del inicio de la producción general. Como buena práctica de la planta QC, el contratista puede optar por realizar un lote de prueba de forma independiente, especialmente si no está familiarizado con los materiales, como podría ser el caso de una planta portátil en una ubicación remota.

Los lotes de prueba son una producción limitada de la mezcla que se toma como muestra para realizar pruebas y que luego se coloca en la pila de reciclaje. Alternativamente, la mezcla podría utilizarse para pavimentar una parte de las instalaciones de la planta o colocarse en otro de los proyectos del contratista que no sean de la agencia. Independientemente del uso que se le dé a la mezcla, el objetivo del lote de prueba es doble:

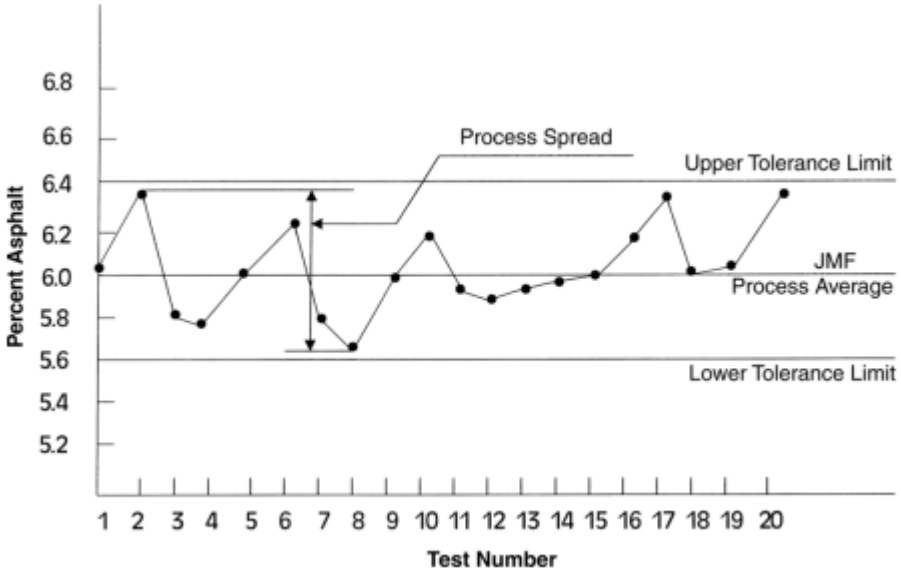
- Demuestra que la planta puede producir la mezcla requerida dentro de las especificaciones.
- Ofrece la primera oportunidad de garantizar que los técnicos del contratista y de la agencia obtengan resultados aceptablemente consistentes en una muestra dividida.

Se pueden evitar problemas si estas dos cuestiones se resuelven antes de colocar cualquier mezcla permanente en el proyecto. Si la mezcla no cumple con las especificaciones, se puede ajustar la producción de la planta hasta que la mezcla cumpla con las especificaciones. Si no puede cumplir con las especificaciones, se requeriría un nuevo diseño de mezcla. Si ya se ha colocado una mezcla que no cumple con las especificaciones, la agencia se ve en la situación de aceptar una mezcla de calidad inferior a un precio negociado más bajo o exigir al contratista que retire y sustituya la mezcla. Cualquier problema relacionado con la adecuación de los resultados de las pruebas del contratista a los de la agencia puede resolverse de antemano con muestras divididas del lote de prueba.

Una vez que el lote de prueba y la comparación de laboratorio sean satisfactorios, el contratista puede pasar a la tira reactiva o a la producción completa.

11.6.5 Gráficos de control

Una última forma en que las plantas pueden mantener el control de las mezclas que producen es mediante el seguimiento periódico de los gráficos de control generados en el laboratorio. Los gráficos de control son representaciones gráficas de las mediciones de QC o los resultados de las pruebas que se utilizan para identificar variaciones en un proceso de producción o colocación, como se muestra en la figura 163. Pueden representar pruebas individuales o medias móviles. También se pueden representar los límites de especificación, como en este ejemplo. La diferencia entre el resultado alto y el bajo es la dispersión del proceso (rango móvil), que debe minimizarse en la medida de lo posible.



Fuente: **Manual de pavimentación con asfalto mezclado en caliente 2000, 2.ª edición**

Figura 163. Ejemplo de gráfico de control

Los gráficos de control pueden ser una referencia visual rápida e invaluable para detectar tendencias en los datos y cuán cerca de los límites de especificación se encuentran los datos de prueba. Una revisión del ejemplo de la Figura 163 muestra que todos los datos se encuentran dentro de los límites de especificación. En este ejemplo, no se observa ninguna tendencia discernible. Sin embargo, los gráficos de control son una herramienta excelente para revelar tendencias en la producción, tales como resultados de pruebas que aumentan o disminuyen constantemente con el tiempo.

Por ejemplo, un contenido de aglutinante que disminuye constantemente con el tiempo podría revelar una obstrucción en el filtro de la bomba de aglutinante que está empeorando progresivamente. Si los resultados son constantemente altos o bajos, entonces la planta está produciendo con un objetivo incorrecto y se deben realizar ajustes. Los resultados de las pruebas que se encuentran regularmente por encima del límite de control superior y por debajo del límite de control inferior indican una alta variabilidad en el proceso de producción. El operador de la planta debe abordar activamente los problemas que impiden la producción de una mezcla consistente.

Se deben mantener gráficos de control, especialmente para el porcentaje de aglutinante y las gradaciones de cada tamiz, y compartirlos periódicamente con el personal de la planta. El seguimiento continuo de los resultados de estas pruebas es una herramienta valiosa para garantizar que los agregados y los aglutinantes de la planta se alimenten con los valores previstos. También es importante mantener los gráficos de control de otras propiedades de la mezcla, como los huecos de aire y el VMA. Si comienzan a desviarse de las especificaciones, es posible que el responsable de control de calidad tenga que investigar las razones y traducir las soluciones en medidas específicas que debe tomar el personal de la planta.

Los gráficos de control de la densidad de las carreteras deben mantenerse y compartirse periódicamente con los supervisores de campo. El seguimiento de cómo el equipo está logrando la densidad adecuada ayudará al supervisor de campo a utilizar eficazmente al personal y el equipo de campo.

Los gráficos de control son utilizados por el contratista para disminuir la variabilidad, establecer la capacidad del proceso, reducir los costes de ajuste de precios, servir como registro permanente de la calidad, proporcionar una base para la aceptación e inculcar la conciencia de la calidad. Todos los datos de las pruebas de control de calidad y los gráficos de control deben estar bien documentados y compartirse con el personal de la agencia para garantizar que se mantenga la uniformidad en las pruebas entre los dos laboratorios. Si los resultados de las pruebas de control de calidad y de la agencia comienzan a diferir, se deben tomar medidas inmediatas para comprender por qué se producen las diferencias y adoptar medidas correctivas.

11.7 CONTROL DE CALIDAD EN EL CAMPO: COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN

Las pruebas y mediciones de control de calidad deben realizarse a lo largo del día durante la colocación y la compactación. El éxito del control de calidad durante la colocación depende de que se realicen correcciones mientras la mezcla está caliente y cuando se puede corregir activamente un problema.

11.7.1 Requisitos de temperatura

Dado que el ligante asfáltico es un material termoplástico, sus propiedades cambian considerablemente con los cambios de temperatura. La mezcla asfáltica es más fácil de trabajar y compactar cuando el material está caliente. La mayoría de las especificaciones incluyen requisitos de temperatura en varias áreas clave.

11. 7.1.1 Temperatura máxima de la mezcla

La temperatura máxima de la mezcla asfáltica suele especificarse para evitar el envejecimiento prematuro y la oxidación de la mezcla. Un límite máximo típico es 325 °F (163 °C). A veces, el

límite máximo se amplía a 350 °F (177 °C) para mezclas modificadas con polímeros.
Por supuesto, el límite se reduce cuando se produce WMA para su uso a temperaturas más frías. El límite real puede variar en función de las diferentes tecnologías WMA. Los contratistas suelen utilizar la tecnología WMA como ayuda para la compactación a temperaturas HMA. No se debe desaconsejar esta práctica debido a la gran importancia que tiene una compactación adecuada de la capa.
La temperatura máxima se verifica mejor en un lugar cercano al punto de descarga de la mezcla, lo antes posible después del mezclado. Un lugar ideal para las plantas de mezcla con tambor es la rampa de descarga del tambor al transportador de listones, como se muestra en la figura 164. Los termómetros infrarrojos son la mejor herramienta para medir la temperatura en este lugar.

Fuente: Instituto del Asfalto

Figure 164. Mezcla que se descarga del tambor

11.7.1.2 Temperatura mínima inmediatamente detrás de la regla

La temperatura mínima de la capa suelta inmediatamente detrás de la regla se especifica a menudo para facilitar la compactación. Si una capa está demasiado fría antes de que los rodillos la golpeen, será imposible lograr la densidad adecuada. Un límite mínimo típico es 250 °F (121 °C). Debe entenderse claramente que esta temperatura es un mínimo, no un objetivo. Una vez más, el límite a menudo se reduce cuando se coloca WMA.
El lugar de medición debe estar lo más cerca posible de la parte posterior de la regla. Una vez más, los termómetros infrarrojos son una gran herramienta siempre y cuando el rodillo aún no haya llegado al lugar de medición. Los tambores de los rodillos suelen rociarse con una solución de agua jabonosa para evitar que la mezcla se adhiera al tambor. Esta solución puede reducir la temperatura de la superficie superior extrema de la capa y dar lugar a información errónea de una pistola infrarroja. Si un rodillo ya ha pasado por el lugar de medición, un termómetro de aguja proporcionará los mejores resultados para conocer la temperatura real de la capa.

11.7.1.3 Temperatura ambiente o superficie mínima

Una mezcla asfáltica retiene bien el calor mientras se encuentra en la parte trasera de un camión. Como se explica en la sección 8.4.2, el calor se disipa rápidamente una vez colocada,

especialmente en capas más finas. Esta es una de las razones por las que los operadores de pavimentadoras no deben acelerar si hay varios camiones alineados delante de la pavimentadora, dejando atrás a los operadores de rodillos. Si la superficie existente ya está fría, el calor de la mezcla se disipará aún más rápidamente. La mayoría de las especificaciones establecen una temperatura ambiente mínima o una temperatura superficial mínima para facilitar la retención del calor de la capa. Las capas más gruesas retienen mejor el calor que las más finas, por lo que a menudo la especificación también incluye un componente de espesor de la capa. También se pueden hacer concesiones para el WMA frente al HMA. A modo de ejemplo, la tabla 12 muestra los requisitos de temperatura base de la especificación P-401 de la FAA para la construcción de aeropuertos.

Tabla 12. Especificación de temperatura superficial de la FAA

Espesor Alfombra	Base Temperatura (Mínima) °F	°C
3 pulgadas (7.5 cm) o más	40[1]	4
Más de 2 pulgadas (50 mm) Pero menos de 3 pulgadas (7.5 cm)	45	7

Fuente: Circular consultiva 150/5370-10H de la FAA (Tabla 4 del punto P-401)

11.7.1.4 Temperatura mínima de la superficie para el laminado de acabado

Una capa asfáltica seguirá siendo compactable hasta que la temperatura del aglutinante sea tan baja que el agregado de la capa comience a romperse bajo el rodillo de acabado. Para proteger la capa, muchas agencias especifican una temperatura mínima de la superficie para el laminado de acabado, a menudo alrededor de 140 °F (60 °C). Dado que la función del rodillo de acabado es eliminar cualquier marca y lograr una suavidad final, la densidad de la capa ya debería haberse alcanzado mucho antes de que la temperatura de la capa descienda a este nivel.

11.7.2 Tiras reactivas

Las franjas de prueba, o «franjas de control», suelen construirse antes de comenzar la pavimentación de producción regular para cada mezcla
de asfalto. Al igual que un lote de prueba garantiza que la planta pueda producir una mezcla que cumpla con las especificaciones, una franja de prueba garantiza que el personal de campo pueda colocar y compactar una capa que cumpla con las especificaciones. También permiten una segunda oportunidad para verificar la mezcla y la concordancia de los resultados de las pruebas entre los laboratorios. Las franjas de prueba están compuestas por tramos de pavimento más cortos, normalmente de 150 a 300 m (500 a 1000 pies). Los requisitos de la FAA para las franjas de control de los aeródromos se basan en el tonelaje (mínimo 250) o en 1/2 sublote, lo que sea mayor. Las pistas de prueba de los aeródromos de la FAA y el Departamento de Defensa también deben incluir dos carriles de pavimentación con una junta fría longitudinal entre ellos. Si es posible, las pistas de prueba deben construirse en el proyecto, con el mismo equipo y materiales que se utilizarán para el resto del proyecto. Algunas circunstancias pueden justificar que la pista de prueba se coloque en otro lugar.

Si los resultados de la franja de prueba indican que el JMF es adecuado para producir materiales conformes, y se puede lograr la extensión, colocación y compactación adecuadas, entonces se puede proceder a la producción del pavimento. Si los resultados de la franja de prueba no cumplen con las especificaciones del proyecto, o si cambia la sección transversal típica existente, se pueden realizar ajustes y producir una nueva franja de prueba.

Al igual que un lote de prueba garantiza que la planta pueda producir una mezcla que cumpla con las especificaciones, una tira de prueba garantiza que el personal de campo pueda colocar y compactar una carpeta que cumpla las especificaciones.

El contratista debe supervisar de cerca la siguiente lista de controles de colocación:

- Aplicación de la capa de adherencia.
- Velocidad de entrega de la mezcla asfáltica.
- Velocidad de la pavimentadora.
- Ajustes de la pavimentadora.
- Control de nivelación.
- Control de espesor.
- Control de densidad:
    - Temperatura del aire y de la mezcla.
    - Tipo de rodillo.
    - Patrón y cobertura de apisonado.
    - Velocidad del rodillo.
- Control del espesor de rendimiento.
- Control de suavidad.

11.7.3 Densidad de la estera

Ver vídeo:
Espesor mínimo

El objetivo de compactar un pavimento asfáltico es lograr una densidad adecuada. El contenido de huecos de aire resultante en la capa asfáltica es, en muchos sentidos, el factor más importante que afecta al rendimiento de la mezcla a lo largo de la vida útil del pavimento.
La compactación se ve afectada por muchos factores además de los que se miden específicamente durante la colocación de la mezcla. Esto significa que los problemas de baja densidad en un proyecto pueden no resolverse simplemente ajustando el patrón de compactación o las temperaturas. El gerente de control de calidad y el superintendente del proyecto pueden necesitar analizar todos los datos de control de calidad, incluyendo los de la producción de la mezcla, para abordar los problemas de compactación. Al abordar un problema de compactación, el equipo de pavimentación debe revisar sus propias operaciones y procedimientos para la colocación y operación de compactación, prestando especial atención a las temperaturas y manteniendo una adherencia disciplinada a una buena técnica de rodillo y

El objetivo de compactar un pavimento asfáltico es lograr la densidad adecuada. El contenido de huecos de aire resultante en la capa asfáltica es, en muchos sentidos, el factor más importante que afecta al rendimiento de la mezcla.

patrones de rodillo consistentes y probados.
Una variedad de métodos está disponible para controlar la calidad de la compactación de una mezcla de asfalto. Esos métodos se discutirán con más detalle a continuación. Estos métodos suelen estar impulsados por las especificaciones, sin embargo, por lo que el control de calidad se basará en los métodos especificados para la aceptación de la compactación. Los esfuerzos de control de calidad deben centrarse en establecer y documentar el cumplimiento de las especificaciones actuales.

Hay tres formas de calcular los valores de compactación, y cada una de ellas da resultados muy diferentes. La compactación puede especificarse por el porcentaje del TMD, la densidad de laboratorio en masa o la densidad de una franja de control. Es una buena práctica, y lo más comúnmente especificado, medir la densidad como un porcentaje del TMD. Para los aeródromos, la FAA y el DoD anteriormente especificaban la densidad como un porcentaje de la densidad de laboratorio, pero las especificaciones actuales P-401 y UFGS 32 12 13.15 han pasado a un porcentaje del máximo teórico. El método especificado debe ser claramente entendido tanto por la agencia como por el contratista. Un método de control común para la compactación es simplemente medir la densidad in situ.

Estas densidades medidas se compararán con la densidad de referencia especificada (típicamente TMD), y se calculará un porcentaje de la densidad de referencia. Las mediciones de densidad nuclear son la forma más común de prueba de densidad de QC para obtener retroalimentación rápida que guíe los patrones de rodillos. Se han desarrollado dispositivos no nucleares y están ganando popularidad para las pruebas de densidad de control de calidad (QC). Las pruebas de control de calidad (QC) para la densidad también se pueden realizar utilizando núcleos; sin embargo, esto implica un retraso en los resultados. Utilice núcleos para correlacionar y/o calibrar otros métodos de prueba, especialmente si las lecturas del medidor se van a utilizar para la aceptación. Muchas agencias y fabricantes de medidores han ideado métodos para correlacionar adecuadamente las lecturas de los medidores con los resultados de los núcleos.

11.7.4 Regularidad de la carpeta asfáltica

La regularidad de la capa para fines de control de calidad y aceptación se mide después de la compactación, típicamente con una regla de 10 pies (FAA y DoD especifican 12 pies), un perfilógrafo o un perfilador inercial.

Ver vídeo:
Interpretación de la regularidad

Las inspecciones puntuales generalmente se realizan con la regla recta colocada sobre el pavimento y se mide y registra la desviación de la superficie. Típicamente, no se permiten bultos o hundimientos mayores a 1/8 de pulgada cuando se miden desde los dos bordes exteriores de la regla. Las especificaciones generalmente requieren que estas mediciones se tomen tanto en la dirección longitudinal como en la transversal. Al montar un pequeño conjunto de ruedas en la regla, se pueden realizar verificaciones puntuales inmediatamente detrás del rodillo de acabado mientras la compactación está en curso. Esta retroalimentación inmediata a los operarios de la pavimentadora y del rodillo les permite hacer los ajustes apropiados para corregir los problemas de suavidad antes de que la mezcla se enfríe. La FAA

requiere que las desviaciones mayores de 1/4 de pulgada que atrapen agua en la superficie final, ya sea en dirección transversal o longitudinal, sean rectificadas con diamante y selladas. Históricamente, el perfilógrafo ha sido el método utilizado para medir la rugosidad de los nuevos proyectos de construcción y superposición para su aceptación. El perfilógrafo generalmente es empujado manualmente por el técnico, lo que requiere el cierre de un carril por razones de seguridad. El uso de esta tecnología ha disminuido en los últimos años, ya que ahora se prefieren los perfiles inerciales más rápidos y precisos.

Los perfiladores inerciales pueden recopilar datos verdaderos del perfil del pavimento y datos de distancia longitudinal a velocidades de autopista. Las versiones ligeras de los perfiladores inerciales operan a velocidades más bajas y pueden usarse casi inmediatamente después de terminar el rodado para proporcionar mediciones más oportunas.

11.8 ACEPTACIÓN

La aceptación es el proceso mediante el cual se evalúan todos los factores utilizados por la agencia (es decir, muestreo, pruebas e inspección) para determinar el grado de cumplimiento de los requisitos del contrato y determinar el valor correspondiente para un producto determinado. Las mediciones de control de calidad pueden utilizarse o no en el proceso de decisión de aceptación, dependiendo de la forma en que esté redactada la especificación. Si se utilizan las mediciones de control de calidad del contratista, normalmente se le exige que realice pruebas específicas con la frecuencia indicada.

La agencia también puede basarse en las pruebas o la certificación del proveedor para la aceptación de algunos artículos. Todas las personas que participan directamente en las actividades de aceptación deben estar cualificadas para las responsabilidades que se les asignan y, por lo general, están certificadas por el Departamento de Transporte del Estado o por grupos de aeródromos. Solo los laboratorios cualificados deben realizar las pruebas requeridas. Las especificaciones de control de calidad suelen contener un plan de aceptación que identifica un método de toma de medidas con el fin de determinar la aceptabilidad de un lote de producción y construcción de mezcla asfáltica. El plan de aceptación suele contener lo siguiente:

- Método de prueba y punto de muestreo.
- Tamaño del lote.
- Tamaño de la muestra.
- Medida de calidad.
- Límites de aceptación.
- Evaluación de riesgos.
- Disposiciones de ajuste salarial (describe las deducciones/bonificaciones salariales).

11.8.1 Material de aceptación

A menudo hay varios componentes que influyen en la aceptación del trabajo de un proyecto. Algunos trabajos no son sometidos a pruebas por parte del control de calidad o un representante del propietario. Ciertos productos, como la iluminación que se utiliza en las

pistas de los aeropuertos, se aceptan basándose en algún tipo de certificación del fabricante. Otros productos, como las mezclas asfálticas, se someten a muestreo y pruebas para su aceptación. Las pruebas especificadas pueden incluir algunas o todas las siguientes:

- Contenido de asfalto.
- Gradación (normalmente tamaños de tamiz específicos).
- Volumetría (huecos de aire, VMA, VFA).
- Pruebas de rendimiento (para la formación de baches y el potencial de agrietamiento).
- Pruebas de densidad de la capa (núcleos, medidor de densidad nuclear, medidor de densidad no nuclear).
- Suavidad.

Las pruebas especificadas (y, por lo tanto, los costes de estas) deben ser proporcionales al tamaño y/o la importancia del proyecto. Los proyectos más pequeños pueden especificar muy pocas pruebas a intervalos poco frecuentes para ayudar a garantizar que el propietario reciba un producto de calidad sin gastar demasiado en relación con el coste del proyecto. Los proyectos más grandes, o incluso los proyectos más pequeños a los que se les asigna un alto nivel de importancia por diversas razones, suelen requerir un mayor número de pruebas a intervalos más frecuentes.

11.8.2 Respuestas a los resultados negativos de las pruebas

El lenguaje contractual suele ser insuficiente cuando no se detallan las consecuencias del incumplimiento de los requisitos del contrato. Las respuestas pueden variar mucho, dependiendo del trabajo que no cumpla con las especificaciones y en qué medida. Las posibles respuestas, ordenadas de menos a más costosas, podrían incluir las siguientes:

11.8.2.1 No hacer nada

El propietario puede optar por no tomar ninguna medida en respuesta a un trabajo que no cumpla con las especificaciones si la funcionalidad prevista no tiene efectos perjudiciales a largo plazo. Por ejemplo, si el contenido de aglutinante es demasiado bajo en un cruce temporal. Si el cruce funciona trasladando de forma segura el tráfico de una zona a otra durante el tiempo previsto y luego se retira, no hay razón para aplicar ningún tipo de penalización por un contenido bajo de aglutinante. No es necesariamente razonable aplicar los requisitos de las mezclas asfálticas destinadas a durar 20 años a las mezclas asfálticas destinadas a durar 6 meses.

18.8.2.2 Dejar en su lugar, pero exigir una garantía ampliada

Esta opción puede ser viable cuando los efectos previstos del material fuera de especificación se manifiestan en un plazo relativamente corto, tal vez en unos pocos meses o años. Un ejemplo de ello es una mezcla que cumple los requisitos de ensayo de deformación durante el diseño de la mezcla, pero que no los cumple durante los ensayos de control de calidad o de aceptación requeridos durante la producción. La mayor parte de la formación de roderas en una capa se producirá durante el primer verano de servicio. Cualquier formación adicional de roderas probablemente tendrá lugar durante el segundo verano de servicio. Por lo tanto, una garantía de dos años que describa los límites máximos

de roderas y las respuestas requeridas del contratista para reparar el problema probablemente serviría a los intereses del propietario. Dado que las grietas suelen aparecer más tarde en la vida útil de la capa, esta puede no ser una buena opción para las pruebas de grietas fallidas.

11.8.2.3 Lijar las zonas rugosas para que cumplan los requisitos de suavidad.

En lugar de aplicar una penalización, a veces se permite a los contratistas pulir con diamante las zonas rugosas que no cumplen las especificaciones de lisura. Por ejemplo, en el caso de los aeródromos, la norma P-401 establece que las zonas con protuberancias o depresiones que superen los criterios de nivelación o suavidad y que retengan agua en la superficie deben ser pulidas, siempre que el espesor del curso después del pulido no sea más de 1/2 pulgada (12 mm) inferior al espesor especificado en los planos.
Por supuesto, el trabajo de pulido debe realizarse con el equipo adecuado y suficientes cuchillas para evitar que el proceso provoque deshilachamientos, fracturas de áridos, desconchones u otros daños en el pavimento. También debe proporcionar transiciones suaves a las zonas que no requieran pulido.

11.8.2.4 Deducir salario

Una sanción más severa por resultados que no cumplen con las especificaciones es una deducción salarial. En las especificaciones basadas en estadísticas, el MOQ es cualquiera de varias herramientas matemáticas que se utilizan para cuantificar el nivel de calidad de una característica de calidad individual. Estas herramientas, como AAD y PWL (discutidas en las secciones 11.2.3.1 y 11.2.3.2), permiten una evaluación de los datos de prueba que muestran resultados defectuosos. La cláusula de ajuste salarial del contrato penaliza al contratista con un porcentaje del coste de la oferta. Cuanto más se aleje de la especificación, mayor será la sanción. La peor deducción salarial es dejar el material en su sitio, pero aplicar una deducción salarial del 100 %.

11.8.2.5 Colocar sellador de superficie o recubrimiento fino

Esta opción no penaliza al contratista reduciendo el porcentaje pagado por un elemento concreto de la licitación. Más bien, exige al contratista realizar algún tipo de trabajo adicional sin coste alguno para el propietario. Esta opción podría aplicarse si la superficie de la estera presentara algún tipo de defecto que no fuera estructural. Quizás la superficie pudiera parecer tener una textura abierta y las pruebas de permeabilidad in situ mostraran una alta permeabilidad donde no era deseable. El sellado de la superficie reduciría la permeabilidad de la losa. Otro ejemplo podría ser que el contratista no utilizara un agregado específico resistente al deslizamiento o al pulido en la mezcla de la superficie. Una fina capa de recubrimiento proporcionaría una nueva superficie de desgaste. El contratista podría colocar uno de estos tipos de superficie sin coste alguno si la penalización por no hacerlo superara el coste de la nueva superficie.

11.8.2.6 Remover y sustituir

Esta opción es la sanción más severa que los propietarios pueden imponer. Si la calidad del trabajo es tan deficiente que el propietario incurriría en altos costos para rehabilitarlo o mantenerlo, se ordenaría eliminar el trabajo y reemplazarlo, todo a cargo del contratista. No solo existe

Una penalización del 100 por ciento por el primer intento de realizar el trabajo, pero también existe el costo adicional de hacerlo todo de nuevo

Sería mejor si las situaciones que conducen a estas acciones punitivas estuvieran claramente descritas en los documentos del contrato. Tanto el propietario como el contratista comprenderían claramente las consecuencias de cualquier trabajo por debajo del estándar. Si las situaciones no estuvieran acordadas en el contrato, a menudo se recurre a acciones legales, lo cual podría ser costoso para ambas partes.

También debe señalarse que lo contrario es cierto: muchas especificaciones proporcionan incentivos al contratista por una calidad medida por encima de un umbral prescrito. Estos incentivos normalmente vienen en forma de algún tipo de pago adicional, pero también pueden presentarse como requisitos más flexibles en áreas relacionadas de las especificaciones

11.7.1 Aceptación del Proyecto

El enfoque del control de calidad (QC) es la aceptación del material. Sin embargo, cuando el trabajo del proyecto está esencialmente completo, se realiza una inspección final con respecto a la aceptación final del proyecto. Se verifica la finalización de las tareas principales y se genera una lista de pendientes con tareas relativamente menores por completar antes de que el proyecto sea aceptado.

Generalmente, se produce una estimación final para reflejar los elementos que quedan por resolver, tales como los siguientes:

- Acuerdo de reducciones de precio aplicadas por trabajo o materiales que no cumplen las especificaciones del contrato.
- Incentivos que deben pagarse por trabajo o materiales que califican.
- Daños liquidados evaluados por no completar el trabajo del proyecto dentro del plazo especificado.
- Registros de nómina, si se requieren.
- Copias de cualquier garantía del fabricante para materiales, equipos e instalaciones.
- Verificación de la limpieza final.
- Liberación completa de todas las reclamaciones por mano de obra y materiales.
- Declaraciones firmadas por subcontratistas indicando que el pago fue recibido.
- Formularios de finalización del impuesto sobre ventas.
- Todos los planos requeridos “conforme a obra” o “según lo construido”.
- Cualquier otro ajuste requerido por el contrato.

La aceptación del proyecto es simplemente el proceso de asegurarse de que las actividades y la documentación del proyecto estén completas—que cada detalle esté meticulosamente atendido para que no se requiera ningún pago adicional o correspondencia entre el propietario y el contratista.

12. Problemas en la carpeta

Los problemas en la carpeta pueden definirse como defectos que ocurren en la mezcla asfáltica durante o poco después de que se hayan completado las operaciones de extendido y compactación. Estos problemas se dividen en dos categorías principales: Problemas relacionados con el equipo Problemas relacionados con la mezcla Dentro de cada una de estas categorías, la mano de obra deficiente y la falta de adherencia a las mejores prácticas generan muchos de los problemas en la carpeta descritos a continuación. En esta sección, se revisan los problemas principales de la carpeta y se presenta una descripción de cada problema, incluyendo sus causas, soluciones y efectos en el desempeño a largo plazo del pavimento. Dado que la segregación puede ser un problema serio en la carpeta, el Capítulo 10 de este manual está dedicado a este tema.

La Tabla 13 resume los problemas de la carpeta revisados. La primera columna enumera los distintos problemas, mientras que las columnas restantes enumeran las posibles causas de cada uno. Las marcas de verificación (✓) indican causas relacionadas con el equipo. Las x indican causas relacionadas con la mezcla, que generalmente deben corregirse mediante cambios en el diseño de la mezcla. A lo largo de la discusión de causas se proporcionan referencias cruzadas a secciones anteriores donde puede encontrarse información más detallada. Se debe tener en cuenta que, debido a la interacción entre causas relacionadas con el equipo y causas relacionadas con la mezcla, no se ha intentado clasificar las diferentes causas.

Tabla 13. Problemas de la Manta y Sus Causas

CAUSAS RELACIONADAS CON LA PAVIMENTADORA

PROBLEMA	Fluctuación de Material (Cabeza)	Fiefnos Alimentatos Sobrecargados	Sinfines Alimentadores Sobrecargados	Velocidad de la Pavimentadora Muy Rápida	Muy Poco Bombeo en mmbeo en la Regla	Sobrecorrección del Control de Espesor	Juego Excesivo en Mecánica de la Regla	Regla Montada sobre Cilindros de Elevación	Placas de Regla Desgastadas o Deformadas	Placas de Regla Plegla Flojas	Regla Fría	Vertedera en Regla Despegada Muy Baja	Tolva de Alimentación Lo Vacía entre Cargas	Tolva de Alimentación do Foerzas	Compuertas de Alimentación Mal Ajustadas	Sinfinsdarixd Mivel Deoonomto	Sinfines Inversos Desgastados o Instalados	Calibración Incorrecta de Regla Regla a "Cero"	Extensiones de Regla Mal Instaladas	Vibradores de tarbienda Mal Instaladas	Grade Control Hunting (Sensitivity Too	Oscilación de Control de Nivel (Sensibilidad Muy Alta)	Rende Rasede Nivel Rinadecuada	Porlado de Espera Largo entre Cargas	Solape de Junta Incorrecto
Superficie Ondulada: Ondas Cortas (Rizado)																									
Superficie Ondulada: Ondas Largas Superficie Ondulada: Ondas Largas	✓	✓	✓				✓	✓		✓										✓	✓	✓	✓		
Desgarro de Carpeta: Ancho Completo	✓	✓				✓	✓	✓					✓	✓						✓			✓	✓	
Desgarro de Carpeta: Franja Central			✓						✓		✓														
Desgarro de Carpeta: Franjas Exteriores					✓				✓		✓			✓	✓										
Textura de Carpeta: No Uniforme				✓					✓			✓													
Marcas de la Regla	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓		✓					✓	✓					✓	
Regla No Responde a Corrección							✓																		
Sombras del Sinfín			✓				✓	✓		✓										✓					
Mala Pre-compactación		✓																							
Junta Longitudinal Deficiente			✓					✓											✓						
Junta Transversal Deficiente	✓	✓				✓		✓												✓	✓	✓			✓
Agrietamiento Transversal (Checking)		✓					✓	✓		✓						✓	✓								
Carpeta Desplazándose bajo el Rodillo																									
Exudación o Manchas de Grasa en la Carpeta																									
Marcas de Rodillo																									
Mala Compactación de la Mezcla																									

OTRAS CAUSAS RELACIONADAS

PROBLEMA	Espesor Inadecuado de Carpeta (para Agregado Max.)	Camiones Golpeen la Pavimentadora	Frenos del Camión la Pavimentadora	Frenoridén Rolimeno de/e	Operación Inadecuada de Rodillo	Estacionamiento del Rodillo en Carpeta Caliente	Preparación Inadecuada de la Base	Diseño Inadecuado de Mezcla (Agregado)	Diseño Inadecuado de Mezcla (Asfalto)	Mix Segregatdn x	Moisturre le Mix	Variarión re Mix Temperature	Cold Mix Temperature
Superficie Ondulada: Ondas Cortas (Rizado)													
Superficie Ondulada: Ondas Largas Superficie Ondulada: Ondas Largas				X	X			X	X	X		X	
Desgarro de Carpeta: Ancho Completo		X	X	X		X	X			X		X	
Desgarro de Carpeta: Franja Central	X							X	X	X	X	X	X
Desgarro de Carpeta: Franjas Exteriores													X
Textura de Carpeta: No Uniforme													X
Marcas de la Regla	X			X				X	X	X		X	X
Regla No Responde a Corrección		X	X										
Sombras del Sinfín	X											X	X
Mala Pre-compactación								X	X	X			
Junta Longitudinal Deficiente	X			X									X
Junta Transversal Deficiente					X								X
Agrietamiento Transversal (Checking)					X								X
Carpeta Desplazándose bajo el Rodillo				X	X			X	X		X	X	
Exudación o Manchas de Grasa en la Carpeta				X	X	X		X X	X X		X X	X X	
Marcas de Rodillo				X	X	X	X					X	
Mala Compactación de la Mezcla				X	X	X	X	X	X		X	X	X

Busque el problema arriba: ✓ indica causas relacionadas con la terminadora y X indica otras causas que deben investigarse.
NOTA: Muchas veces un problema puede ser causado por más de un factor; por lo tanto, es importante que cada causa listada sea descartada para asegurar que el problema sea resuelto

12.1 OLEAJE EN LA SUPERFICIE

12.1.1 Descripción

Una superficie asfáltica puede presentar dos tipos de ondas: cortas y largas. Las ondas cortas, también llamadas arrugas o sombras de sinfín (auger shadows), suelen estar separadas de 1 a 3 pies (0.3 a 0.9 m), siendo la separación más común entre 1-1/2 a 2 pies (0.45 a 0.60 m). Las ondas largas están mucho más separadas. La distancia entre ellas puede corresponder a la distancia entre camiones que descargan la mezcla. Las ondas largas también pueden estar asociadas al cambio de dirección o puntos de reversa del equipo de compactación, especialmente en capas de gran espesor o cuando la mezcla colocada es muy blanda y fluye longitudinalmente debajo del equipo de compactación.
Otro tipo adicional de defecto en la superficie del pavimento es una rugosidad o efecto "washboard" (ondulaciones tipo lavadero) causada por una operación inadecuada del rodillo vibratorio. La distancia entre estas ondas es generalmente muy pequeña, típicamente menor a 3 o 4 pulgadas (75 o 100 mm).
También pueden aparecer golpes transversales en nuevas capas de mezcla asfáltica colocadas sobre sellos de grietas. Esto es causado por el deslizamiento o arrastre de la mezcla nueva durante la primera pasada del rodillo de compactación inicial

12.1.2 Causas

Una de las principales causas de ondas cortas o arrugas es la fluctuación del nivel de material frente a la regla de la terminadora (paver screed). La variación en la cantidad de mezcla que es llevada nuevamente hacia los sinfines por los transportadores de listones (slat conveyors) y depositada frente a la regla provoca que la regla suba y baje a medida que cambia la fuerza que empuja contra ella. Cuando hay demasiada mezcla (en la parte alta de los sinfines) y luego muy poca mezcla (en la parte baja de los sinfines) en la cámara de los sinfines frente a la regla, se genera una superficie ondulada porque la regla reacciona a esta variación en la fuerza aplicada.

El nivel fluctuante de material hace que la regla gire alrededor de su punto de pivote y "busque" un ángulo de ataque estable.
A medida que el ángulo de ataque de la regla cambia, también cambia
el espesor de la capa que se está colocando, afectando directamente la regularidad

espesor de la capa que se está colocando, afectando directamente la seguridad superficial de la nueva capa (ver Sección 7.3.3). Otra causa de las ondas cortas es una regla que se encuentra en malas condiciones mecánicas, es decir, una regla con juego excesivo

En las conexiones del control de la regla (ver Sección 7.3). Las ondas cortas también pueden formarse en la capa debido a una instalación incorrecta o sensibilidad inapropiada del control automático de nivelación de la terminadora, o por el uso de un dispositivo de referencia de nivel inadecuado. El problema también puede estar relacionado con una referencia móvil (barra flotante o floating beam) que rebota, o con el conductor del camión aplicando los frenos mientras el camión es empujado por la terminadora (ver Sección 6.6.1).
Las ondas cortas también pueden estar relacionadas con el diseño de la mezcla, especialmente cuando la mezcla varía en rigidez debido a cambios en la temperatura o en la composición de la mezcla (ver Capítulo 3).

A medida que la rigidez de la mezcla varía, también cambian las fuerzas que la mezcla ejerce sobre la regla, lo que provoca que esta suba y baje, generando una capa con ondas cortas. Finalmente, si el diseño de la mezcla es inadecuado en cuanto a la gradación de agregados, el contenido de asfalto, la temperatura de la mezcla o el contenido de humedad (cuando la mezcla está “tierna”), los rodillos pueden empujar o desplazar la mezcla durante el proceso de compactación. Sin embargo, las ondas cortas generalmente son originadas por la terminadora, ya sea debido a su operación o a cambios en la rigidez de la mezcla, más que por la operación del equipo de compactación. Las ondas largas son generadas por algunas de las mismas variables que producen las ondas cortas. La fluctuación en la cantidad de material frente a la regla y la variación en la rigidez de la mezcla hacen que la regla reaccione a los cambios en la fuerza ejercida sobre ella.

Si la distancia entre los picos de las ondas corresponde a la longitud del pavimento entre las cargas de mezcla provenientes de los camiones, entonces las ondas pueden haber sido causadas por compuertas de flujo de la tolva de la pavimentadora mal ajustadas (ver Sección 7.2.2) o por que la tolva de la pavimentadora y los transportadores de listones hayan sido vaciados entre cargas de mezcla (ver Sección 7.2.3). Una condición mecánica deficiente y una operación incorrecta de la regla (por ejemplo, cambiar continuamente los volantes de control manual del espesor; ver Sección 7.3.4), así como controles automáticos de nivelación mal instalados (ver Sección 7.4.2), también pueden causar un problema de ondas largas. Si se utiliza una línea guía (stringline) como referencia de nivel, una curvatura o caída en la línea entre los postes de soporte también puede ser causa de ondas largas (ver Sección 7.4.2.7). Otro factor que contribuye a la rugosidad de ondas largas es la entrega inadecuada de la mezcla a la pavimentadora, especialmente si el camión golpea la pavimentadora al acercarse o si el conductor mantiene los frenos aplicados mientras el camión es empujado por la pavimentadora (ver Sección 6.6.1). Un factor adicional puede ser la condición de la superficie subyacente: las ondas largas pueden reflejar las ondas presentes en la base del pavimento.

Las ondas largas también pueden encontrarse en aquellos puntos donde el equipo de compactación invierte su dirección. Este problema es más frecuente cuando la capa de asfalto que se está colocando tiene un espesor mayor a aproximadamente 4 pulgadas (100 mm). El problema puede agravarse cuando el tamaño máximo del agregado utilizado en la mezcla es relativamente pequeño en comparación con el espesor de la capa aplicada. Las ondas son causadas por una onda de empuje (bow wave) que se forma frente al rodillo cuando la mezcla está tierna.

Las ondas largas pueden ser causadas por la segregación de la mezcla entre carga y carga de camión (ver Sección 6.4) y por variaciones en la temperatura de la mezcla (ver Sección 3.2.5). Ambas deficiencias provocan que las fuerzas ejercidas sobre la regla varíen, lo que resulta en una superficie ondulada. El equipo de compactación también puede generar una capa ondulada si el operador del rodillo gira o invierte la máquina de manera demasiado brusca.

La rugosidad o efecto “washboarding” (ondulaciones tipo lavadero) normalmente es causada por una operación inadecuada de un rodillo vibratorio (ver Sección 8.5). Este tipo de equipo debe operarse a alta frecuencia y a una velocidad correspondiente que permita lograr un mínimo de 10 IPF (impactos por pie). Sin embargo, es generalmente una buena práctica que los rodillos no excedan las 2-1/2 a 3 mph (típicamente la velocidad de una persona caminando), para asegurar un tiempo de permanencia adecuado sobre la superficie. La amplitud debe ajustarse en función del espesor de la capa que se está compactando normalmente una amplitud alta para una capa de mezcla más gruesa y una amplitud baja para una capa más delgada.

una configuración de amplitud baja para una capa más delgada. El efecto de ondulación puede empeorar si el rodillo se opera a alta velocidad, especialmente si la frecuencia es menor a 2,400 VPM.

La formación de golpes transversales es el resultado de que el rodillo de compactación inicial (breakdown roller) genere una onda de empuje (bow wave) o un arrastre del asfalto de la capa de recubrimiento durante la primera pasada. El calor de la capa de recubrimiento se transfiere hacia el pavimento subyacente y hacia el sellador de grietas. La naturaleza adhesiva del sellador produce una fuerza resistente mayor que la fricción del pavimento circundante. Cuando la onda de empuje frente al rodillo pasa sobre el sellador adhesivo, que tiene mayor fricción, se produce una reducción en la velocidad de dicha onda; entonces, el rodillo de compactación inicial pasa por encima de la onda, creando un golpe ligeramente desplazado respecto a la grieta inferior, en la dirección de avance de la pavimentadora

12.1.3 Soluciones

Las ondas cortas (arrugas) solo pueden eliminarse evitando su formación. El factor más importante para prevenir las ondas cortas es mantener lo más constante posible la cantidad de mezcla (nivel de material) frente a la regla. Además, la rigidez de la mezcla, que depende tanto de su temperatura como de su composición, debe mantenerse lo más estable posible. La cantidad de mezcla se controla mediante: un ajuste adecuado de las compuertas de flujo de la tolva, y manteniendo los transportadores de listones y los sinfines operando la mayor parte del tiempo posible (cercano al 100 %) mientras la máquina avanza. La rigidez de la mezcla se controla en la planta de asfalto, manteniendo constantes. la temperatura de la mezcla, la gradación de los agregados, y el contenido de fluidos (contenido de asfalto + contenido de humedad). Cualquier factor que provoque un cambio en el volumen o en la rigidez de la mezcla frente a la regla puede generar ondas cortas o arrugas en la capa.

Las ondas cortas (ondulaciones) solo pueden eliminarse evitando su formación. El factor más importante para prevenir las ondas cortas es mantener la cantidad de mezcla (cabeza de material) frente a la regla lo más constante posible.

Las ondas en la superficie causadas por problemas con los controles automáticos de nivelación pueden detectarse apagando dichos controles y verificando si las ondas continúan formándose. Si los controles de nivelación son los responsables, entonces se debe revisar la operación y el manual de operación y mantenimiento proporcionado con esos controles debe consultarse para determinar la acción correctiva adecuada. Las curvaturas o caídas (sags) en una línea guía (string line) pueden identificarse observando visualmente a lo largo de la línea mientras el sensor de nivelación pasa junto a ella. Las ondas cortas o largas causadas por la condición mecánica o la operación de la regla de la pavimentadora generalmente pueden detectarse mediante una observación cuidadosa de la pavimentadora durante la colocación de la mezcla. Las ondas largas formadas por una operación incorrecta del camión de acarreo o del equipo de compactación también pueden detectarse fácilmente observando dichas operaciones.

Si la ondulación (washboarding) es causado por una operación incorrecta de un rodillo vibratorio, debe realizarse un ajuste en uno o más de los siguientes parámetros: la configuración de amplitud vibratoria, la frecuencia vibratoria y la velocidad del rodillo.

Los métodos para prevenir los golpes transversales causados por el sellador de grietas en la superficie existente incluyen el uso de mezclas asfálticas de recubrimiento con altas propiedades de fricción, tales como: mezclas abiertas (open-graded), stone mastic asphalt (SMA), o mezclas densas (dense- graded) con agregados altamente angulares y fracturados. Durante la compactación inicial (breakdown rolling), cuando el tambor delantero no motriz se desplaza hacia adelante, tiende a empujar la mezcla en lugar de jalarla bajo el tambor motriz. Este empuje genera una onda de empuje (bow wave) más grande en la mezcla, lo que con frecuencia produce golpes transversales. El uso de un riego de adherencia (tack coat) más rígido y/o permitir que el riego de adherencia seque completamente para mejorar la unión adhesiva entre la capa de recubrimiento y el pavimento base también ha demostrado reducir el desplazamiento del recubrimiento y disminuir la formación de golpes.

12.1.4 Efectos en el Desempeño

El desempeño a largo plazo del pavimento se ve afectado por las ondas en la superficie, tanto cortas como largas, de dos maneras. Primero, las ondas reducen la regularidad superficial del pavimento, lo que disminuye la calificación de condición del pavimento o el índice de serviciabilidad presente (PSI) de la vía. El desempeño estructural del pavimento solo cambia si las ondas son lo suficientemente severas como para incrementar las cargas dinámicas o de impacto sobre el pavimento bajo tráfico pesado o carga de aeronaves. Sin embargo, las aeronaves son especialmente susceptibles a vibraciones excesivas y a la fatiga de componentes, particularmente como respuesta a ondas largas en la superficie. Segundo, las ondas cortas y los factores que las generan pueden afectar los niveles de densidad del pavimento. Una mezcla tierna generalmente es más difícil de compactar adecuadamente que una mezcla estable; como resultado, puede producirse una disminución en la densidad y un incremento en el contenido de vacíos de aire, lo que conduce a una reducción en la vida útil del pavimento.

La ondulación es básicamente una rugosidad incorporada en la superficie del pavimento durante la operación de compactación. Debido a que afecta el grado de densidad alcanzado en el proceso, este defecto puede reducir significativamente la durabilidad a largo plazo de la capa de pavimento. Además, la ondulación contribuye a una conducción incómoda para los vehículos que utilizan la vía.
Los golpes transversales también contribuyen a la pérdida de calidad de rodadura.

12.2 DESGARRO (TEARING / STREAKS)

12.2.1 Descripción

Existen tres tipos generales de desgarro o arrastre de la mezcla asfáltica bajo la regla de la pavimentadora.

Estos tres tipos se definen según la ubicación de las marcas de desgarro en la capa: a) En el centro del carril, b) En los bordes exteriores, y c) A lo largo de todo el ancho del carril.

12.2.2 Causas

Un surco del engranaje (gearbox streak) puede observarse en la superficie de la capa directamente detrás del centro de la regla principal. Este surco suele tener 6 a 8 pulgadas (150 a 200 mm) de ancho y normalmente es causado por una falta de mezcla asfáltica que es empujada debajo de la caja de engranajes del sinfín ubicada frente al centro de la regla. Esta falta de mezcla puede ser el resultado de ajustes incorrectos de las compuertas de flujo —no se alimenta suficiente mezcla de regreso a la regla. Es más probable que sea causado por sin fines invertidos faltantes, desgastados o mal ajustados, o por paletas en los sinfines (ubicadas junto a la caja de engranajes) que deben forzar la mezcla debajo de la misma (ver Sección 7.2.2.4).

La textura rugosa en la superficie es el resultado de una falta de mezcla en ese punto del pavimento, ya que pasa menos mezcla debajo de la regla en la caja de engranajes que la que pasa bajo la regla en cualquiera de los lados. La textura más rugosa, o desgarro, hace que la superficie parezca más abierta o segregada. Sin embargo, este surco puede ser una forma de segregación cuando la gravedad permite que la mezcla proveniente de los transportadores fluya hacia abajo de la caja de engranajes. La superficie en ese punto puede ser más abierta que la mezcla adyacente y generalmente tiene un color más oscuro. Los surcos del engranaje son más frecuentes con mezclas más duras —aquellas que contienen agregados de mayor tamaño, agregados más triturados o menores contenidos de asfalto.

Un surco en el centro del carril también puede ser causado por un ajuste incorrecto de la corona (crown) en la regla principal. La aparición de surcos detrás de la regla es causada principalmente por una relación incorrecta entre las coronas en los bordes delantero (front) y trasero (back) de la regla (ver Sección 7.3.9). Un desgarro o una textura abierta de varios pies (m) de ancho en el centro de la capa puede deberse a falta de corona delantera (lead crown) en la regla. Por el contrario, un desgarro o textura abierta en ambos bordes exteriores de la mezcla se debe normalmente a exceso de corona delantera. Para la mayoría de las mezclas, la corona delantera debe estar ligeramente más alta (aproximadamente 1/8 in [3 mm]) que la corona trasera. Una relación apropiada entre ambas coronas da como resultado una textura uniforme de la mezcla en todo el ancho. Los surcos en los bordes pueden ser causados por ajustes incorrectos de las compuertas de flujo o por instalación incorrecta de las extensiones de la regla. El desgarro parcial también puede ser causado por placas de la regla frías, si la regla no ha sido precalentada uniformemente antes de iniciar la pavimentación (ver Sección 7.3.8).

El desgarro en ancho completo puede atribuirse a varios factores. Uno es placas de la regla deformadas o desgastadas. Otro factor es que la velocidad de avance de la pavimentadora sea demasiado alta para una mezcla determinada. El uso de una mezcla con agregados demasiado grandes en comparación con el espesor colocado también puede causar desgarro a todo lo ancho. Una regla práctica es que la profundidad mínima compactada debe ser al menos tres veces el tamaño máximo del agregado grueso o tres veces el NMAS. Así, una mezcla con un tamaño máximo de agregado de 19.0 mm (3/4 in) [NMAS de 12.5 mm (1/2 in)] debe colocarse a por lo menos 38 mm (1-1/2 in). Finalmente, las bajas temperaturas de mezcla

Particularmente cuando se combinan con una regla de la pavimentadora fría, pueden afectar de manera significativa la cantidad de desgarro que se produce (ver Capítulo 7).

12.2.3 Soluciones

Un surco del engranaje (gearbox streak) normalmente puede eliminarse únicamente cambiando la cantidad de mezcla que se fuerza bajo la regla en la caja de engranajes del sinfín. Este cambio se logra instalando paletas o sinfines invertidos a cada lado de la caja de engranajes para empujar más mezcla debajo de ella. Si la pavimentadora ya está equipada con dichos dispositivos, deben revisarse para verificar si están desgastados y necesitan reemplazo.

El desgarro en el centro o en los bordes exteriores generalmente puede eliminarse ajustando la relación entre las coronas delantera y trasera en la regla de la pavimentadora. Si esto no resuelve el problema, deben modificarse los ajustes de las compuertas de flujo de la pavimentadora. El desgarro a ancho completo puede eliminarse: aumentando la temperatura de la mezcla, precalentando adecuadamente la regla antes de iniciar la pavimentación. reemplazando placas de regla deformadas o desgastadas, o aumentando el espesor de la capa colocada.

12.2.4 Efectos en el Desempeño

El desgarro de la capa afecta el desempeño del pavimento a largo plazo causando cambios en la densidad en las zonas donde ocurre el desgarro. Las áreas desgarradas pueden parecer segregadas y suelen ser deficientes en cantidad de mezcla. El desempeño del pavimento se verá reducido en función de: cuánto reduce el desgarro la densidad, y cuánto aumenta el contenido de vacíos de aire. Las áreas desgarradas también serán más susceptibles al desmoronamiento y a los efectos de la humedad (stripping)

12.3 TEXTURA NO UNIFORME

12.3.1 Descripción

La textura no uniforme de la capa (ver Figura 165) puede describirse como diferencias en la apariencia de la mezcla, tanto transversal como longitudinalmente, a medida que se coloca y compacta. Normalmente, las variaciones menores en la textura superficial serán evidentes debido a las diferencias en la alineación de las partículas de agregado grueso más grandes a medida que la mezcla sale desde debajo de la regla de la pavimentadora. Además, una mezcla con un mayor contenido de agregado fino (arena) tiende a tener una textura más uniforme que una mezcla con un mayor porcentaje de agregado grueso.

12.3.2 Causas

Muchos factores relacionados con la operación de la pavimentadora afectan la uniformidad de la textura superficial de la mezcla (ver Capítulo 7). Una cantidad variable de mezcla contra la regla, causada por sobrecargar los sinfines o por operar la tolva vacía entre cargas de camión, puede provocar variaciones en la cantidad de mezcla que se introduce debajo de la regla, y, por lo tanto, generar una textura no uniforme.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos

Figura 165. Textura No Uniforme de la Capa

El mantenimiento inadecuado de la regla, incluyendo placas de regla desgastadas o flojas o extensiones de regla incorrectamente instaladas, así como una frecuencia vibratoria baja en la regla, pueden alterar la textura de la capa y causar no uniformidad. Además, una temperatura baja de la mezcla, causada ya sea por problemas en la planta o porque la pavimentadora permanece demasiado tiempo detenida entre cargas de mezcla, puede ser un factor en la textura desigual, especialmente si la regla de la pavimentadora también está fría. El desgarro que ocurre cuando el espesor de la capa compactada es menor al doble del tamaño máximo de las partículas de agregado es otro factor que contribuye a la textura no uniforme.

Una base blanda o cedente bajo la capa que se está construyendo puede hacer que la nueva capa tenga una textura superficial variable (ver Sección 5.2). Además, la segregación de la mezcla, causada por: un mal diseño de mezcla (Sección 3.4.4), o un manejo inadecuado de la mezcla durante las operaciones de producción (Sección 4), carga (Sección 6.4), transporte (Sección 6.5), descarga (Sección 6.6), o colocación (Capítulo 7), también puede contribuir a una textura superficial no uniforme. La variabilidad de la textura estará influenciada por cualquier factor que cause no uniformidad en la mezcla, como desviaciones en: la gradación de los agregados, el contenido de asfalto, o la temperatura de la mezcla (ver Capítulo 3).

12.3.3 Soluciones

Las soluciones para lograr una textura superficial uniforme son tan variadas como sus causas. La operación de la pavimentadora, especialmente en lo referente a la necesidad de mantener un nivel constante de material (head of material) frente a la regla, debe ser supervisada cuidadosamente. Tanto la pavimentadora como la regla deben estar bien mantenidas y en buenas condiciones de operación. El espesor compactado de la capa que se coloca debe diseñarse de modo que: Para las mezclas de gradación densa (dense-graded), el espesor compactado sea al menos cuatro veces el NMAS. Para las mezclas de gradación fina (fine- graded), el espesor compactado sea al menos tres veces el NMAS.

Finalmente, una mezcla que sea tierna, que presente variabilidad en la gradación de agregados o en el contenido de asfalto, o que sea fácilmente segregable, debe modificarse para aumentar su rigidez y mejorar sus propiedades antes de ser producida en la planta y entregada a la pavimentadora para su colocación.

12.3.4 Efectos en el Desempeño

La textura superficial no uniforme generalmente está asociada a una densidad no uniforme. Con el mismo esfuerzo de compactación, normalmente se alcanzará una menor densidad en las zonas donde el agregado grueso ha sido arrastrado por la regla de la pavimentadora o donde ha ocurrido segregación de la mezcla, en comparación con las zonas que presentan una textura superficial uniforme.

12.4 MARCAS DE LA REGLA

12.4.1 Descripción

Las marcas de la regla son indentaciones transversales en la superficie de la capa asfáltica. Ocurren cuando la pavimentadora se detiene entre cargas de mezcla provenientes de los camiones.

Dependiendo del tipo de mezcla que se esté colocando, algunas marcas de regla pueden ser apenas perceptibles, mientras que otras pueden ser muy notorias y profundas. Las marcas longitudinales también pueden ocurrir cuando se utilizan extensiones rígidas o hidráulicas, y la elevación de la extensión no coincide con la de la regla principal.

12.4.2 Causas

Existen varias causas de las marcas transversales de la regla (ver Sección 7.3 para una discusión de las operaciones de la regla). Una causa es el excesivo juego en las conexiones mecánicas de la regla.

Estas marcas también aparecen cuando la regla está configurada incorrectamente y apoya excesivamente su peso en la parte trasera. Si la mezcla asfáltica es tierna y la pavimentadora está equipada con una regla muy pesada, como extensiones hidráulicas con extensiones rígidas adicionales acopladas, la regla tenderá a hundirse en la mezcla y dejar marcaciones

Existen varias causas de las marcas transversales de la regla Una de ellas es el excesivo juego en las conexiones mecánicas de la regla. Otra causa es que el camión de acarreo golpee a la pavimentadora.

Si cualquiera de estas causas está involucrada, las marcas de la regla serán visibles cada vez que la pavimentadora se detenga. Otra causa es que el camión de acarreo golpee a la pavimentadora cuando se mezcla, o que el conductor del camión mantenga los frenos aplicados cuando la pavimentadora comienza a empujar el camión (ver Sección 6.6.1). En estos casos, las marcas de la regla aparecerán únicamente cuando el acoplamiento entre el camión y la pavimentadora se realiza de manera incorrecta. Las marcas longitudinales de la regla son causadas por un ajuste incorrecto de las extensiones de la regla en relación con la regla principal.

Cuando se utilizan extensiones, su posición vertical debe ajustarse en el mismo plano y con el mismo ángulo de ataque que la regla principal. Si se emplean extensiones rígidas, entonces

extensiones rígidas están si las extensiones rígidas se ajustan a una elevación incorrecta, se producirá una marca longitudinal en el punto donde se unen las diferentes secciones de la regla. Si se utilizan extensiones hidráulicas, pueden aparecer dos marcas longitudinales: una en el extremo de la regla principal y otra en el borde interior de la extensión en cada lado de la máquina.

12.4.3 Soluciones

Si las marcas transversales de la regla son resultado de la condición mecánica o de una configuración incorrecta de la regla de la pavimentadora, la regla debe ser reparada. Si las marcas son causadas por el camión golpeando a la pavimentadora, la operación de extendido debe modificarse para que la pavimentadora levante al camión, en lugar de que el camión retroceda hacia la pavimentadora. Además, una vez que la pavimentadora ha hecho contacto con el camión, el conductor debe aplicar solo la presión de freno necesaria para mantener el contacto si no se utiliza un enganche para camión (ver Sección 7.2.1).

En algunos casos, especialmente si la mezcla es muy “tierna”, las marcas de la regla pueden eliminarse evitando detener la pavimentadora entre cargas de mezcla. Esto se puede lograr usando un elevador de andana o un MTV para entregar la mezcla a la tolva de la pavimentadora. Sin embargo, si se utilizan camiones volquete para transportar la mezcla, generalmente es mejor detener la pavimentadora entre cada carga (deteniéndola y reiniciándola tan rápido como sea posible) en lugar de permitir que el operador deje vaciar la tolva, reduzca la cabeza de mezcla frente a la regla y aumente la probabilidad de segregación entre cargas. En caso de que la pavimentadora se detenga por un periodo prolongado, el operador debe usar la función de asistencia de la regla (boost), que presuriza la parte inferior de los cilindros de elevación de la regla durante la detención, evitando que ésta se hunda y genere una depresión en la carpeta.

Para lograr una textura superficial uniforme, la elevación y el ángulo de ataque de las extensiones de la regla deben coincidir con los de la regla principal. Las marcas longitudinales causadas por un ajuste incorrecto de la elevación de las extensiones pueden eliminarse corrigiendo la posición de cada extensión respecto a la regla principal. Puede que se requieran ajustes tanto en la posición vertical como en el ángulo de ataque de las extensiones. Estos ajustes deben realizarse siempre que se utilicen extensiones hidráulicas o rígidas.

12.4.4 Efectos en el Rendimiento

Las marcas transversales de la regla generalmente no son perjudiciales para la durabilidad de la carpeta. Sin embargo, pueden afectar la comodidad del rodaje al generar un bache cuando dichas marcas no pueden ser completamente eliminadas por el equipo de compactación. En muchos casos, las marcas de la regla tienen menos efecto en el desempeño de la mezcla que la desaceleración y el arranque de la pavimentadora cuando el operador intenta mantenerla en movimiento mientras el camión vacío se retira y el camión cargado retrocede hacia la tolva.

Las marcas longitudinales de la regla indican que el nivel de la mezcla bajo las extensiones de la regla es diferente al que existe bajo la regla principal. Si las marcas de la regla son severas, la

diferencia Puede producirse una compactación diferencial a lo largo de la marca o 'junta', ya que el equipo de compactación inicialmente se desplazará sobre la parte más alta de la carpeta. Las marcas pueden dejar una cresta en la mezcla si no pueden ser completamente eliminadas.

12.5 SENSIBILIDAD DE LA REGLA

12.5.1 Descripción

A medida que se ajustan las manivelas de control de espesor en la regla (*screed*), el ángulo de ataque de la regla aumenta o disminuye. A medida que la pavimentadora avanza para colocar la mezcla, la regla sube o baja hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio correspondiente al espesor de carpeta recién configurado. Cuando la regla no responde a los cambios en el ajuste de las manivelas de control de espesor, el operador no puede modificar la profundidad de la capa que se está colocando. La pavimentadora también pierde su capacidad inherente —basada en el principio de la regla flotante— de proporcionar la acción de autonivelación necesaria para colocar una carpeta asfáltica uniforme.

12.5.2 Causas

Una velocidad de pavimentación excesivamente alta (más de 83 ft [25 m] por minuto para capas delgadas o más de 50 ft [15 m] por minuto para capas de más de 2-1/2 pulgadas [63 mm] de espesor) puede causar una falta de capacidad de respuesta de la regla (*screed*) (ver Sección 7.3.4). La condición mecánica de la regla afecta su capacidad de reaccionar. Si la regla se apoya sobre sus cilindros de elevación o si existen conexiones flojas en las manivelas de control de
espesor, la regla será poco sensible. Si se utilizan controles automáticos de nivelación (ver Sección 7.4.2), una ubicación incorrecta del sensor impedirá que la regla reaccione a las señales emitidas por los sensores de nivel.

Si el tamaño máximo del agregado en la mezcla es demasiado grande en comparación con la profundidad de la mezcla que se está colocando, la regla se apoyará o arrastrará las partículas de agregado más grandes. Como resultado, la regla no podrá modificar su ángulo y, por lo tanto, no responderá a los cambios en los ajustes de control de espesor. Las variaciones en la temperatura de la mezcla también harán que la regla no responda a cambios en el ángulo de ataque porque las variaciones en la rigidez de la mezcla provocan que la regla busque continuamente nuevos niveles de equilibrio para las fuerzas que actúan sobre ella.

12.5.3 Soluciones

La pavimentadora (*paver*) y la regla (*screed*) deben estar en buenas condiciones de funcionamiento. El sensor de los controles automáticos de nivelación no debe ubicarse ni en los puntos de arrastre (*tow points*) ni detrás de los puntos de pivote de la regla; más bien, debe colocarse en el área comprendida entre un tercio y dos tercios de la longitud de los brazos de nivelación. Si la textura de la mezcla es uniforme (lo que indica una relación adecuada entre el espesor de la capa y el tamaño máximo del agregado), la regla podrá responder a los cambios en los ajustes del control de espesor.

12.5.4 Efectos en el Rendimiento

Una regla no responsiva provoca una carpeta asfáltica rugosa. La regla es incapaz de reaccionar a los cambios manuales en los ajustes de espesor. También pierde su capacidad de auto-nivelarse sobre una superficie de pavimento existente, porque no puede reducir el espesor de la mezcla colocada sobre los puntos altos de esa superficie ni aumentar el espesor colocado en las áreas bajas.

12.6 SOMBRAS DE LA SUPERFICIE

12.6.1 Descripción

Las sombras de superficie (sombreados del sinfín/auger) son áreas oscuras que aparecen en la superficie de una mezcla. En la mayoría de los casos, estas sombras no pueden verse hasta algún tiempo después de que el pavimento ha sido utilizado por el tráfico y parte de la película de ligante asfáltico ha sido desgastada de las partículas de agregado expuestas por los neumáticos de los vehículos. Las sombras de superficie se observan con mayor facilidad cuando el sol está bajo en el horizonte y se mira el pavimento en dirección hacia el sol. También son visibles cuando la superficie del pavimento está húmeda o cuando se observa desde el espaldón de la vía durante la noche con las luces de los vehículos iluminando la superficie.

En casos severos, las sombras de superficie pueden ser visibles inmediatamente detrás de la regla durante la operación de extendido. Incluso en este último caso, las sombras desaparecerán cuando la mezcla está siendo compactada por los rodillos, para luego volver a hacerse visibles bajo las condiciones descritas anteriormente. Las sombras pueden abarcar completamente el ancho del carril colocado o solo una parte de este. La extensión de las sombras depende de cómo se esté operando la pavimentadora, particularmente del tiempo de encendido/apagado de los sinfines en cada lado de la máquina.

12.6.2 Causas

Las sombras de superficie son causadas principalmente por la sobrecarga de los sinfines (augers) de la pavimentadora (ver Sección 7.2.2.4). Si la cabeza de material en la cámara del sinfín es lo suficientemente grande como para “enterrar” los sinfines, la regla reaccionará a las fuerzas variables que actúan sobre ella. El espaciamiento entre las sombras normalmente corresponderá al encendido de los sinfines cuando estos operan en modo de arranque–parada. Cada vez que la cantidad de mezcla frente a la regla está a la altura o por encima de la parte superior de los sinfines, se formarán sombras que luego serán visibles en el pavimento.

En la mayoría de las pavimentadoras es posible ajustar la distancia entre la regla y la unidad tractora. Esto se logra desatornillando las conexiones en los brazos de nivelación o arrastre de la pavimentadora y moviendo el tractor hacia adelante o hacia atrás mientras la regla permanece estacionaria sobre la superficie del pavimento. Dependiendo de la marca y el modelo de la pavimentadora, normalmente existe un ajuste de aproximadamente 4 pulgadas (100 mm) para la conexión de la regla. La severidad de las sombras de superficie puede aumentar cuando la regla está en la posición trasera — cuando se transporta más mezcla en la zona frente a la regla—.

la cámara de los sinfines (auger) y los sinfines están siendo sobrecargados. Se cree que las sombras son el resultado de un ligero aumento en la densidad de la mezcla causado por el reinicio de los sinfines y el consecuente empuje de mezcla adicional bajo la regla. No existe diferencia en la textura superficial asociada con la ubicación de las sombras; solo pueden verse desde un ángulo.
Su intensidad a menudo aumenta cuando se está colocando una mezcla tender (susceptible a desplazarse).

12.6.3 Soluciones

La mezcla asfáltica que se transporta en la cámara de los sinfines (auger) debe mantenerse a un nivel cercano al centro del eje del sinfín. Esto significa que las compuertas de flujo deben ajustarse de modo que los sinfines operen tan cerca del 100 % del tiempo como sea posible, minimizando los ciclos de encendido y apagado. En ningún caso debe permitirse que la mezcla cubra completamente la parte superior de los sinfines. Además, la posición de la regla debe ajustarse lo más adelante posible, para reducir la cantidad de material en la cámara de los sinfines y mantener al mínimo la cabeza de material frente a la regla. La regla no debe colocarse en la posición trasera a menos que se esté colocando una mezcla de agregado grueso (una en la cual el tamaño máximo del agregado sea mayor a 1-1/2 pulgadas [37.5 mm]).

12.6.4 Efectos en el Rendimiento

Las sombras superficiales no son necesariamente perjudiciales para el desempeño de la mezcla, excepto por un leve efecto en la comodidad de rodadura. La diferencia en la densidad de la mezcla entre las áreas con sombras y las áreas sin sombras generalmente no es lo suficientemente grande como para determinarse con precisión. La principal preocupación con las sombras superficiales es la apariencia visual de la mezcla para los conductores.

12.7 MALA PRECOMPACTACIÓN

12.7.1 Descripción

Una pavimentadora de asfalto moderna normalmente está equipada con una regla vibratoria. Este tipo de regla permite que la mezcla sea parcialmente compactada al pasar por debajo de ella.
Dependiendo de variables como la velocidad de avance de la pavimentadora, el espesor de la capa, la temperatura de la mezcla y las condiciones ambientales, la densidad de la mezcla asfáltica medida detrás de la regla antes de la compactación suele estar alrededor del 70 al 90 % de la DTM (mezcla sin vacíos).

Algunas pavimentadoras están equipadas con reglas combinadas, que incluyen tanto barras de golpeo (tamper bars) como vibradores. A bajas velocidades de la pavimentadora, la regla combinada logra típicamente una mayor compactación de la mezcla que la obtenida solo con una regla vibratoria. Sin embargo, a velocidades superiores a 25 ft (7.5 m) por minuto, el aumento en esfuerzo de compactación proporcionado por la barra de golpeo generalmente se pierde, y el grado de compactación obtenido es similar al que se logra con una simple regla vibratoria.

12.7.2 Causas

La cantidad de precompactación lograda con la regla disminuye a medida que aumenta la velocidad de la pavimentadora (ver Sección 7.3.6). La precompactación generalmente aumenta ligeramente cuando aumenta la frecuencia de vibración de la regla. Sin embargo, la precompactación disminuye significativamente si la regla está apoyándose sobre los cilindros de elevación de la regla, lo que limita el esfuerzo de compactación disponible. El nivel de precompactación obtenido también se ve limitado cuando: la capa es demasiado delgada para el tamaño máximo de agregado usado en la mezcla (menos de cuatro veces el NMAS para mezclas de gradación gruesa, o menos de tres veces el NMAS para mezclas de gradación fina; ver discusión previa sobre textura no uniforme), la mezcla está demasiado fría, o la base sobre la que se coloca la nueva capa está blanda o cede (ver Sección 5.2).

12.7.3 Soluciones

La disminución de la velocidad de la pavimentadora (paver) y el aumento de la frecuencia de vibración de la regla pueden, dentro de ciertos límites, incrementar el nivel de precompactación alcanzado durante la operación de extendido. También es posible, en algunos modelos de pavimentadoras, aumentar la amplitud de la vibración para incrementar la fuerza de impacto de la regla sobre la mezcla. Un mantenimiento adecuado de la regla también ayuda a obtener un esfuerzo de compactación uniforme por parte de esta.

12.7.4 Efectos en el Rendimiento

Si se logra el nivel de densidad requerido utilizando rodillos convencionales detrás de la pavimentadora, el nivel de precompactación alcanzado por la regla no afectará el desempeño a largo plazo de la capa. Sin embargo, puede ser posible reducir el número de pasadas de los rodillos necesarias para cumplir con los criterios de densidad y contenido de vacíos si la cantidad de precompactación lograda por la regla es mayor. Además, un mayor nivel de densidad de precompactación puede reducir la compactación diferencial que ocurre en los puntos bajos y en áreas con surcos.

12.8 PROBLEMAS EN LAS JUNTAS

Ver vídeo:
Construcción de juntas transversales
Construcción de juntas longitudinales

12.8.1 Descripción

Las juntas transversales deficientes se asocian ya sea con un bache en la junta, un hundimiento en la superficie del pavimento varios pies (metros) más allá de la junta, o ambos. Las juntas longitudinales (LJs) deficientes (ver Figura 166) entre pasadas de la pavimentadora generalmente se caracterizan por una diferencia de elevación entre los dos carriles, por desprendimiento de la mezcla asfáltica en la junta, o ambos. El área adyacente a la LJ usualmente se encuentra deprimida por debajo del nivel de la superficie del pavimento circundante.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 166. Junta longitudinal deficiente debido a una construcción insatisfactoria

12.8.2 Causas

Los problemas en las juntas son causados por una construcción deficiente de la junta, una compactación inadecuada de la mezcla colocada a lo largo de la junta, procedimientos incorrectos de arranque al reanudar el pavimentado después de una parada, o por la construcción y remoción inadecuadas de los empalmes (tapers).

18.8.3 Soluciones

Una clave para una buena junta transversal es construir la junta al final del día de pavimentación en un lugar de la carpeta donde el espesor de la capa sea constante (ver Sección 9.2 para una discusión sobre la construcción de juntas). Esto significa que el espesor compactado de la carpeta al final de la pasada de la pavimentadora debe ser el mismo que el de la carpeta colocada previamente. Para aeródromos, un buen punto es el extremo del pavimento, ya que esto eliminará la necesidad de una junta transversal.

Al iniciar el pavimentado al día siguiente, la regla de la pavimentadora debe colocarse sobre bloques en el lado frío de la junta transversal. El espesor de los bloques debe estar relacionado con la profundidad de la capa que se va a colocar, aproximadamente 1/4 pulgada (5 mm) de espesor por cada 1 pulgada (25 mm) de espesor compactado de la capa. Luego, el borde frontal de la regla de la pavimentadora debe colocarse directamente sobre la cara vertical de la junta.
Una vez que la pavimentadora se aleja de la junta, la cantidad correcta de mezcla estará en el lugar adecuado, y normalmente solo será necesario un rastrillado mínimo, si acaso. La mezcla en la junta debe compactarse lo más rápidamente posible.

Para la construcción del empalme longitudinal (ver Sección 9.3), es extremadamente importante compactar adecuadamente el borde del primer carril. Para lograrlo, se requiere que el rodillo vibratorio o estático de rueda de acero sobresalga aproximadamente 6 pulgadas sobre el borde no soportado de la mezcla. Esta práctica proporciona el mayor esfuerzo de compactación a lo largo del borde no confinado sin causar un desplazamiento lateral excesivo de la mezcla en el borde del pavimento.

Al colocar el segundo carril de pavimento (adyacente), la placa terminal de la regla de la pavimentadora debe superponerse al primer carril entre 1 y 1,5 pulgadas. Debe realizarse un rastrillado mínimo,

Para la construcción de la junta longitudinal (LJ), es extremadamente importante compactar adecuadamente el borde del primer carril. Para lograrlo, es necesario que el rodillo de acero —ya sea vibratorio o estático— sobresalga aproximadamente 6 pulgadas sobre el borde no soportado de la carpeta.

si es que se hace, sobre la mezcla colocada sobre el primer carril. Los rodillos —vibratorios, de neumáticos y rueda de acero estática— deben operar en el lado caliente de junta y extenderse 6 pulgadas sobre la junta en el lado frío. La misma cantidad debe aplicarse sobre la junta longitudinal (LJ) que sobre cada punto del interior de la capa de mezcla asfáltica en caliente HMA.

12.8.4 Efectos en el Rendimiento

Una junta transversal deficiente no afectará de manera significativa el rendimiento del pavimento si se alcanzan niveles adecuados de densidad mediante el equipo de compactación. Generalmente, una mala calidad de rodadura será el único resultado negativo. Sin embargo, una junta longitudinal (LJ) mal construida puede disminuir seriamente la funcionalidad de la estructura del pavimento.
Una junta mal colocada y compactada se desgranará y provocará que un lado de la junta quede más bajo que el otro. Los escombros producidos por el desgranamiento del pavimento son una gran preocupación en todos los aeródromos. Si el nivel de densidad es demasiado bajo, todo el espesor de la capa del pavimento en la LJ puede desgastarse bajo la acción del tráfico. Una junta deficiente también será porosa, permitiendo que el agua ingrese a las capas subyacentes del pavimento.

12.9 VERIFICACIÓN

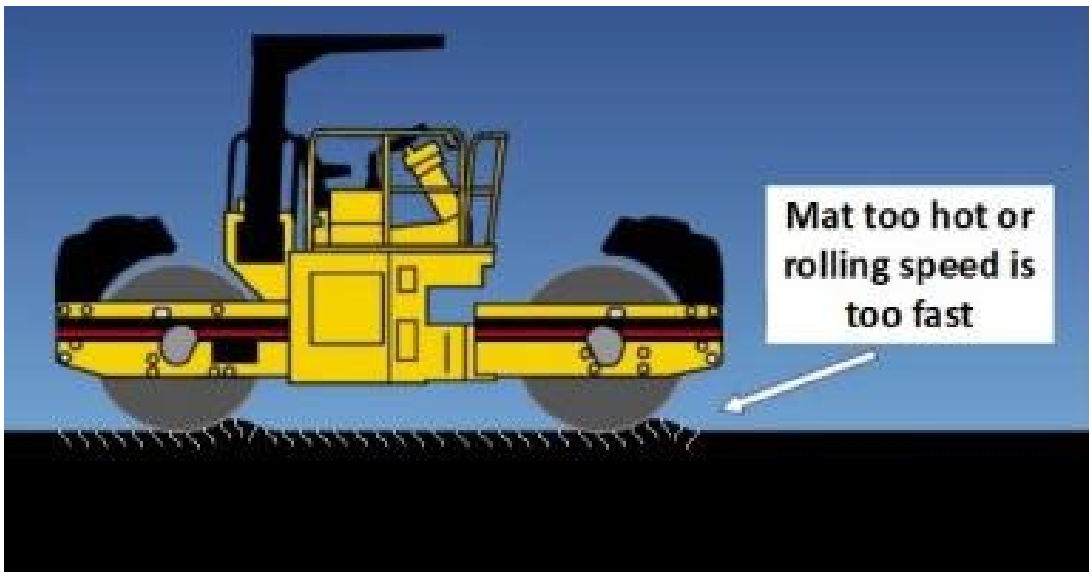
12.9.1 Descripción

La verificación se puede definir como pequeñas grietas transversales, generalmente de 1 a 3 pulgadas de longitud y separadas entre 1 y 3 pulgadas (25 a 75 mm), que aparecen en la superficie de la mezcla asfáltica en algún momento durante el proceso de compactación (ver Figura 167 y Figura 168).
Estas grietas no son visibles inmediatamente detrás de la regla de la pavimentadora.

Si la verificación va a ocurrir, normalmente se presentará después de que la mezcla haya enfriado a una temperatura inferior a 240 °F (115 °C) y se realicen pasadas adicionales de rodillos

vibratorios o de rueda de acero estática (o ambos) sobre la mezcla. La mayoría de las mezclas asfálticas no presentan verificación durante la compactación.

A medida que la verificación se vuelve más severo, las grietas se alargan y se encuentran más próximas entre sí.



Fuente: Instituto del Asfalto
Figura 167. Verificación *del* rodillo durante la compactación

Las grietas no se extienden completamente a través del espesor de la capa, sino que solo tienen una profundidad de 3/8 a 1/2 pulgada (10 a 13 mm).

12.9.2 Causas

Una mezcla que presenta verificación durante la compactación se considera una mezcla tender (blanda o inestable). La mezcla se empuja o desplaza frente a los tambores de los rodillos, ya sean vibratorios o estáticos de rueda de acero. Las grietas se forman cuando se genera una “ola de empuje” (*bow wave*) frente a los tambores del rodillo, a medida que la mezcla se desplaza longitudinalmente antes de que el rodillo llegue a esa ubicación.

La verificación puede deberse a dos factores principales: (a) una deflexión excesiva de la estructura del pavimento bajo el equipo de compactación (ver Capítulo 5), y (b) una o más deficiencias en el diseño de la mezcla asfáltica (ver Capítulo 3). Una mezcla que presenta verificación no es lo suficientemente estable internamente—no tiene la resistencia interna necesaria a temperaturas elevadas—para soportar el peso del equipo de compactación durante el proceso de rodillada.

Fuente: Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos
Figura 168. Grietas finas causadas por verificación del rodillo

Cuando una base o fundación débil es la causa del problema de verificación, el pavimento subyacente sobre el cual se coloca la nueva capa asfáltica es frágil y cede bajo el movimiento del equipo de compactación. El peso de los rodillos hace que las capas de la estructura del pavimento se muevan, se empujen y se doblen en exceso, lo que coloca a la nueva mezcla en tensión en su superficie. Las marcas de verificación se forman cuando la superficie del nuevo asfalto se separa debido a la deflexión de la estructura del pavimento durante la operación de rodillado. Las grietas deben aparecer en la superficie de la nueva mezcla únicamente en los lugares donde haya movimiento de la estructura del pavimento bajo el equipo de compactación. Si la pavimentadora pasa sobre un punto blando en la estructura subyacente, por ejemplo, la verificación debería presentarse únicamente donde exista ese punto blando.

Una causa más común de verificación son una o más deficiencias en la mezcla: (a) un exceso de fluidos en la mezcla—demasiado ligante asfáltico o demasiada humedad en la mezcla, o ambos;
(b) una elevación en la curva granulométrica de las arenas—demasiado material de arena de tamaño medio (tamices de 1.18 mm y 0.600 mm [N.º 16 y N.º 30]) y muy poca arena fina (0.300 mm y 0.150 mm [N.º 50 y N.º 100]); y (c) falta de espacio en la granulometría del agregado para acomodar el ligante asfáltico (bajo VMA).

Un exceso de fluidos en la mezcla asfáltica vuelve la mezcla *tender* (blanda o inestable) y permite que se desplace fácilmente bajo el esfuerzo de compactación aplicado por los rodillos. La mezcla será *tender* si el contenido de ligante es demasiado alto para la granulometría y características del agregado utilizado, especialmente si la mezcla presenta un VMA bajo. Si la mezcla contiene demasiada humedad debido a que el agregado no fue completamente secado al pasar por el secador de la planta discontinua (*batch plant*) o el mezclador rotatorio (*drum mixer*), el exceso de humedad actuará como ligante a temperaturas elevadas y sobrelubricará la mezcla. La humedad restante en los poros del agregado impedirá que el ligante entre en esos poros del agregado, lo

que en efecto deja una mayor cantidad de ligante entre las partículas del agregado en lugar de quedar parcialmente dentro de este.

Si la inestabilidad (*tenderness*) se debe a un exceso de ligante asfáltico en la mezcla, la verificación debería aparecer de forma regular, diariamente. Si la inestabilidad se debe a un exceso de humedad en la mezcla, la verificación debería ocurrir siempre que la planta no esté operando correctamente. Por ejemplo, puede presentarse en la mezcla el día después de una lluvia, pero no el día anterior. Si en las operaciones de la planta de asfalto no se elimina la humedad adicional del agregado causada por la lluvia en los acopios, esa humedad añadirá fluidez al ligante asfáltico y hará que la mezcla sea *tender*.

Una elevación en la curva granulométrica del agregado fino—un exceso de arena de tamaño medio en la mezcla—también puede volver la mezcla *tender*. Además, las mezclas con bajo contenido de VMA generalmente serán inestables y se desplazarán fácilmente bajo la acción de un rodillo vibratorio o un rodillo estático de rueda de acero. Asimismo, diversas características de las partículas de agregado—como la textura superficial, angularidad, caras trituradas y cantidad de polvo adherido—pueden influir significativamente en la cantidad de verificación que ocurre durante la compactación. Las mezclas con deficiencias en la granulometría del agregado fino o con un VMA inadecuado normalmente presentarán verificación de manera continua, no esporádica. Sin embargo, si la granulometría de la arena es variable, la verificación puede ocurrir únicamente cuando la granulometría es inadecuada. Las deficiencias mencionadas se agravan, y la cantidad de verificación puede aumentar, cuando la temperatura de la mezcla es demasiado alta para el grado de ligante asfáltico utilizado. A medida que aumenta la temperatura de la mezcla, disminuye la viscosidad del ligante, lo que hace que la mezcla sea más *tender*. Otro factor que puede influir en la verificación es la susceptibilidad térmica del ligante asfáltico: cuanto mayor sea esta susceptibilidad, mayor podrá ser la verificación en la mezcla.

Ocasionalmente, la verificación puede ser causado por diferencias de temperatura dentro de una misma capa de mezcla (conocido como *heat checking*). En un día frío y con viento, la temperatura de la mezcla que está en contacto con el pavimento existente puede disminuir rápidamente. La superficie superior de la mezcla también enfriará con rapidez. Sin embargo, la temperatura de la mezcla en la parte media de la capa permanecerá alta. Esta diferencia térmica puede provocar verificación bajo el esfuerzo de compactación de los rodillos.

También existen varias causas secundarias de verificación. Una es una mezcla cuya temperatura es demasiado alta debido a un sobrecalentamiento en la planta. Además, técnicas inadecuadas de compactación pueden causar verificación: rodar demasiado rápido, detenerse bruscamente, hacer giros cerrados sobre la mezcla caliente o realizar un número excesivo de pasadas con el rodillo final, o efectuar el acabado cuando la mezcla aún está demasiado caliente (ver Sección 8).
Finalmente, la verificación puede aumentar cuando existe una mala adherencia entre la nueva capa y la superficie subyacente, ya sea por suciedad o por una aplicación insuficiente o deficiente de la emulsión de adherencia (*tack coat*).

13.9.3 Soluciones

Si la verificación es causada por la presencia de una base débil (*yielding foundation*) debajo de la nueva capa de asfalto, la solución es reparar y preparar adecuadamente la estructura del pavimento existente antes de colocar el nuevo asfalto. Los puntos blandos deben ser retirados y reemplazados. Todas las áreas con deflexión excesiva deben retirarse y reemplazarse o estabilizarse. Se necesita un soporte uniforme en la estructura del pavimento subyacente para que las nuevas capas funcionen adecuadamente.

Si la verificación es causada por una deficiencia en el diseño de la mezcla—un exceso de fluidos en la mezcla o un problema con la granulometría del agregado fino o con el contenido de VMA—la solución a largo plazo es modificar las propiedades de la mezcla. Estos cambios deben realizarse en la planta de asfalto y no pueden corregirse en el lugar de la pavimentación. Si la mezcla contiene un exceso de fluidos—ya sea ligante asfáltico o humedad—se debe reducir el contenido de ligante o secar correctamente el agregado para eliminar toda la humedad. En algunos casos, será necesario reducir la velocidad de producción de la planta para permitir que el agregado se seque completamente. En otros casos, puede ser necesario ajustar las condiciones de operación de la planta (por ejemplo, las aletas o la inclinación del tambor). Si la verificación es causada por la granulometría del agregado fino incorporado en la mezcla, dicha granulometría debe modificarse. Puede ser necesario aumentar o disminuir la cantidad de agregado fino utilizado, añadir una pequeña cantidad de agregado fino con una granulometría diferente, incrementar la angularidad del agregado fino o utilizar un material completamente distinto de otra *Fuente*. Si la verificación es causada por un bajo contenido de VMA en la mezcla asfáltica, deben hacerse ajustes para aumentar el VMA.

A menudo se piensa que la verificación ocurre porque la mezcla está demasiado caliente. Esto es solo parcialmente correcto; la mezcla está demasiado caliente, en ciertos rangos de temperatura, para soportar el peso del equipo de compactación porque carece de la resistencia y estabilidad internas necesarias. Si la mezcla estuviera correctamente diseñada, no estaría demasiado caliente para compactarse a ninguna temperatura inferior a unos 300 °F (150 °C). La mayor parte de la verificación ocurre cuando la mezcla desciende de aproximadamente 240 °F (115 °C) a 190 °F (90 °C); rara vez ocurre cuando la mezcla está por encima de 240 °F (115 °C) o por debajo de 190 °F (90 °C). Sin embargo, con el uso actual de tecnologías de mezclas tibias (*warm-mix*) y la variedad de estas tecnologías, estos rangos de temperatura pueden variar.

A corto plazo, es posible modificar tanto la zona de compactación como el tipo de rodillos utilizados para densificar la mezcla, de modo que se reduzca la cantidad de verificación. Si la mezcla es *tender* debido a un exceso de fluidos, un problema en la granulometría del agregado fino o un bajo contenido de VMA, puede ser posible lograr la densificación adecuada a una temperatura elevada sin provocar verificación.

Una mezcla que presenta verificación es una mezcla *tender*, pero generalmente puede compactarse satisfactoriamente a temperaturas altas—por encima de 250 °F (120 °C). El nivel de densidad requerido puede lograrse, en la mayoría de los casos, si se aplican suficientes pasadas de rodillo antes de que la mezcla se enfríe al punto en que

a partir de la cual comienza el checking. Esto puede lograrse usando dos rodillos de ruptura en lugar de uno—utilizando dos rodillos operando en formación (uno al lado del otro) en vez de usar un solo rodillo de ruptura seguido de un rodillo intermedio. Los dos rodillos de ruptura aplican su esfuerzo de compactación en un lado cada uno de la mezcla recién colocada. Se hacen muchas pasadas en cada punto de la superficie del pavimento antes de que la mezcla comience a presentar checking. Una vez que el checking inicia, el proceso de rodillado se suspende temporalmente.

Si se intenta compactar la mezcla cuando se está moviendo, mostrando shoving o checking bajo la acción de rodillos vibratorios o rodillos de acero estáticos, la mezcla se descompactará en lugar de compactarse. No se debe rodillar con rodillos de acero cuando la mezcla está blanda y presenta checking. La mayoría de las mezclas con blandura permanecerán blandas hasta que la superficie de la mezcla se enfríe a aproximadamente 190 °F (90 °C). A esta temperatura, la mezcla se habrá enfriado lo suficiente para que la viscosidad del ligante asfáltico aumente hasta el punto en que la mezcla pueda soportar nuevamente el peso del equipo de compactación. Los rodillos de acero estáticos pueden utilizarse entonces para lograr la densidad final en la mezcla y eliminar cualquier marca del rodillo en la superficie del pavimento.

Cuando una mezcla blanda está en el rango medio de temperatura, entre aproximadamente 240 °F (115 °C) y 190 °F (90 °C), no debe realizarse rodillado, tal como se mencionó anteriormente, ni con rodillos vibratorios ni con rodillos de acero estáticos. Sin embargo, se puede usar un rodillo neumático en este rango de temperatura porque las llantas de caucho del rodillo normalmente no empujarán la mezcla ni provocarán que la mezcla forme un arco delante de las llantas. La mezcla blanda se densificará, en lugar de presentar checking, bajo el esfuerzo de compactación del rodillo neumático. El rodillado final con un rodillo de acero estático puede completarse una vez que la mezcla se haya enfriado a una temperatura por debajo de 190 °F (90 °C).

En la mayoría de los casos en que ocurre checking en la mezcla, los operadores de rodillos tienden a retirarse y permitir que la mezcla se enfríe. Esta es la forma incorrecta de abordar el problema. Retrasar la compactación permite que la mezcla se enfríe y endurezca, pero con frecuencia no permite el tiempo suficiente para lograr el nivel requerido de densidad. Con una mezcla blanda, puede no ser posible lograr ambos objetivos (sin checking y densidad adecuada) al mismo tiempo si la mezcla se deja enfriar demasiado antes de iniciar las operaciones de rodillado. Es mucho mejor compactar la mezcla tanto como sea posible antes de que empiece el checking, mantenerse alejados de la mezcla en el rango medio de temperatura cuando el checking es más probable que ocurra y luego terminar el rodillado una vez que la mezcla se haya enfriado lo suficiente para soportar el peso del rodillo final.

Si la mezcla que se está compactando es demasiado caliente —por encima de 325 °F (165 °C)— debe dejarse enfriar antes de comenzar el proceso de compactación. Deben corregirse técnicas inadecuadas de rodillado. La superficie del pavimento subyacente debe estar limpia y adecuadamente recubierta con la capa de adherencia (tack coat) antes de comenzar la colocación de la nueva mezcla.

Ninguna de las soluciones al problema del checking funcionará en todos los casos. Cada mezcla tendrá sus propias características de compactación. Para algunas mezclas extremadamente blandas, el checking puede presentarse en un rango más amplio de temperaturas, desde tan alto como 270 °F (130 °C) hasta tan bajo como 170 °F

(75 °C). Como se mencionó, las mezclas que carecen de estabilidad interna generalmente presentarán checking bajo rodillos de acero (operados en modo vibratorio o estático), y por lo tanto estas mezclas deberían ser rediseñadas.

12.9.4 Efectos en el Desempeño

Aunque los checks se extienden solo una corta distancia desde la superficie, son altamente perjudiciales para el desempeño a largo plazo porque las características de una mezcla blanda afectan el nivel de densidad obtenido. Si los rodillos se mantienen alejados de la pavimentadora en un intento de disminuir la cantidad de checking que ocurre, el nivel de densidad obtenido por el equipo de compactación normalmente se reducirá significativamente. Por lo tanto, aumentará el contenido de vacíos de aire de la capa. Una mezcla que presenta checks tendrá por lo tanto menor densidad y una vida útil del pavimento considerablemente reducida bajo tráfico

12.10 EMPUJE Y RUTEO

12.10.1 Descripción

El abultamiento (shoving) de una capa asfáltica es el desplazamiento de la mezcla en una dirección longitudinal. Este desplazamiento puede ocurrir durante la operación de compactación o posteriormente bajo el tráfico. En la mayoría de los casos, el abultamiento durante la construcción va acompañado de una gran onda de mezcla frente al rodillo de compactación, particularmente si ese rodillo es vibratorio o un rodillo de acero estático. El abultamiento también puede ocurrir en conjunto con el checking si la mezcla es lo suficientemente blanda debido a una gradación deficiente del agregado o un exceso de fluidos (ligante asfáltico o humedad). Finalmente, el tapete (mat) o la mezcla pueden experimentar abultamiento en el punto de reversión de los rodillos, especialmente en la zona más cercana al borde de la pavimentadora. Una capa de pavimento que ha experimentado abultamiento bajo la acción del tráfico se muestra en la Figura 169.

El ahuellamiento (rutting), ilustrado en la Figura 170, muestra el desplazamiento de la mezcla tanto en dirección vertical como transversal. Los surcos (rutting) ocurren cuando cargas pesadas pasan sobre una mezcla inestable. En unos pocos casos, el ahuellamiento es puramente vertical (consolidation rutting). En esta situación, la mezcla (o los materiales subyacentes) no fue compactada adecuadamente en el momento de la construcción, y las cargas del tráfico esencialmente terminan el proceso de compactación. La forma más común de ahuellamiento es la distorsión transversal: la mezcla se deforma o es empujada lateralmente como resultado del flujo lateral de la mezcla bajo cargas repetidas de tráfico.

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 169. Deformación por empuje debido a una mezcla insatisfactoria

12.10.2 Causas

El desplazamiento y ahuellamiento (shoving y rutting) se deben principalmente a una mezcla inestable (ver Capítulo 3). Esta inestabilidad puede ser causada por las mismas variables que provocan el checking: un exceso de fluidos (ligante asfáltico o humedad) en la mezcla, un abultamiento en la curva de gradación del agregado fino, o las propiedades del agregado y del cemento asfáltico. El abultamiento y el ahuellamiento pueden ser altamente frecuentes cuando una mezcla con alto contenido de arena se coloca en una capa gruesa (más de 1 1/2 pulgadas [40 mm]) a una temperatura elevada (más de 280 °F [140 °C]). Además, capas más gruesas de una mezcla inestable, en proporción al tamaño máximo del agregado utilizado, tienden a presentar más abultamiento que capas delgadas con el mismo tamaño de agregado y la misma gradación.

Fuente: East Carolina University

Figura 170. Ahuellamiento en una Mezcla Asfáltica Inestable

La operación inadecuada del rodillo, particularmente la reversión repentina, también puede contribuir al empuje (shoving) de la mezcla durante la construcción (ver Capítulo 8). Si un rodillo vibratorio se opera a una velocidad demasiado alta y el espaciamiento de impactos es demasiado grande, la carpeta puede desarrollar un efecto de tabla ondulada (washboarding), donde la distancia pico a pico es equivalente al espaciamiento de los impactos. La ondulación, o abultamiento, es más probable que ocurra a frecuencias normales, pero a velocidades altas donde la fuerza de impacto es mayor. Si un rodillo neumático con alta presión de inflado se utiliza para la compactación inicial (breakdown compaction), una mezcla demasiado blanda puede empujarse lateralmente bajo las llantas. El abultamiento puede ocurrir con cualquier rodillo que se opere incorrectamente.

Otra posible causa de abultamiento es un exceso de material de riego de liga (tack coat) que puede ser arrastrado hacia la mezcla. De manera similar, exceso de asfalto proveniente de una superficie subyacente sangrante o de material de junta puede ser incorporado en la mezcla, aumentando su fluidez y suavidad El abultamiento también puede ocurrir cuando la superficie subyacente es polvorienta o sucia, provocando una falla por deslizamiento (ver Sección 5.5).

12.10.3 Soluciones

La solución para una mezcla que se desplaza (shoves) bajo el equipo de compactación es aumentar su estabilidad interna. Esto puede lograrse reduciendo el contenido de fluidos (ligante asfáltico o humedad, o ambos) de la mezcla, pero solo después de determinar el efecto de un cambio en el contenido de ligante sobre las propiedades mecánicas de la mezcla. La fricción interna puede incrementarse disminuyendo la temperatura de la mezcla. Alternativamente, la fricción interna entre las partículas del agregado puede incrementarse cambiando la gradación del agregado o aumentando la cantidad de partículas angulares (trituradas) en la mezcla.

El proceso de compactación para una mezcla blanda debe modificarse, como se discutió anteriormente bajo checking, para obtener suficiente densidad en el momento de la construcción. Un incremento en la densidad obtenido durante la construcción generalmente reducirá la cantidad de abultamiento y ahuellamiento que pueda ocurrir posteriormente bajo tráfico. Las mezclas arenosas, debido a su naturaleza inherentemente blanda, deben colocarse en capas más delgadas que una capa gruesa cuando se usan como capas base o de unión.

El equipo de compactación debe operarse correctamente para reducir la oportunidad de desplazar la mezcla durante la operación de rodillado. Además, si la superficie subyacente está sucia, debe limpiarse y aplicarse una capa adecuada de riego de liga.

12.10.4 Efectos en el desempeño

Las capas que tienden a desplazarse bajo el equipo de compactación son básicamente inestables. Estas mezclas normalmente continuarán deformándose bajo el tráfico, tanto longitudinal como lateralmente. El desplazamiento de la mezcla durante la construcción es una fuerte indicación de que el pavimento formará roderas más adelante y no tendrá un buen desempeño bajo el tráfico

12.11 SANGRADO Y MANCHAS DE ASFALTO

12.11.1 Descripción

El sangrado de una mezcla asfáltica (ver Figura 171) ocurre cuando el ligante asfáltico fluye hacia la superficie de la mezcla bajo la acción de las cargas del tráfico. El sangrado suele observarse como dos franjas longitudinales brillantes en las huellas de rodadura de la calzada. Las manchas de asfalto en una mezcla asfáltica (ver Figura 172) son áreas aisladas donde el ligante asfáltico ha llegado a la superficie de la mezcla durante la operación de extendido y compactación, o posteriormente bajo el tráfico. Estas manchas pueden aparecer de forma errática e irregular, o pueden ser numerosas y con un patrón bastante regular.

Fuente: Pavement Interactive

Figura 171. Sangrado de asfalto en el carril de circulación

12.11.2 Causa

Las manchas de asfalto (fat spots) son causadas principalmente por un exceso de humedad en la mezcla (ver Capítulo 3). El problema es más común en mezclas que contienen un alto porcentaje de agregados finos (mezclas con exceso de arena) y en aquellas que contienen agregados con alta porosidad. Si toda la humedad presente en los agregados gruesos y finos no se elimina durante las operaciones de secado y mezclado en la planta asfáltica, el vapor de humedad empujará el ligante asfáltico hacia la superficie de la mezcla detrás de la pavimentadora, a medida que la humedad escapa de la mezcla y se evapora. Las manchas de asfalto ocurren con mayor frecuencia cuando los acopios de agregados están húmedos o cuando el contenido de humedad varía en diferentes partes de los acopios

Las manchas de asfalto (fat spots) a veces ocurren en áreas donde productos derivados del petróleo, como aceite o diésel, se derramaron sobre la superficie del pavimento antes de colocar la capa de refuerzo (ver Figura 173).

Las manchas de asfalto son causadas principalmente por un exceso de humedad en la mezcla. El problema es más común en mezclas que contienen un alto porcentaje de agregados finos (mezclas con exceso de arena) y en aquellas que contienen agregados con alta porosidad.

Figura 172) o han contaminado la mezcla. El uso de agentes desmoldantes a base de petróleo en los vehículos que transportan la mezcla también puede causar manchas ricas en ligante (fat spots) en la mezcla asfáltica (ver Sección 6.5.1). Además, las manchas ricas pueden estar asociadas con áreas segregadas en la mezcla (ver Capítulo 10). Si la mezcla depositada en la carretera por la terminadora (paver) está segregada, las zonas donde hay un exceso de ligante asfáltico pueden resultar en material de ligante libre en la parte superior de la capa que se está colocando.

Las causas del sangrado (bleeding) normalmente se dividen en dos categorías. La primera es un exceso de fluidos en la mezcla asfáltica, ya sea ligante asfáltico, humedad, o ambos. Bajo el tráfico, el exceso de humedad y ligante asfáltico es arrastrado hacia la superficie por el paso de las llantas de los vehículos. Este fenómeno de sangrado generalmente ocurre en mezclas nuevas y durante climas cálidos, cuando la viscosidad del ligante asfáltico es baja

Típicamente, el sangrado ocurre poco después de que se permite el paso del tráfico sobre la mezcla fresca, mientras todavía hay algo de humedad en la mezcla y mientras la viscosidad del ligante asfáltico aún es relativamente baja.

Las causas del exudado normalmente se agrupan en dos categorías: un exceso de fluidos en la mezcla asfáltica o una falta de espacio adecuado dentro de la mezcla para albergar el ligante asfáltico.

Fuente: Pavimento Interactivo

Figura 172. Mancha rica causada por un exceso localizado de asfalto

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 173. Mancha causada por un derrame de aceite combustible antes de la construcción de la sobrecarpeta

El sangrado (bleeding) también puede estar asociado con una falta de espacio adecuado en la mezcla para el ligante asfáltico. Si el contenido de VMA y el contenido de vacíos de aire de la mezcla no proporcionan suficiente espacio para el ligante, el sangrado puede ocurrir a medida que la mezcla se densifica por el tráfico, tanto poco después de la construcción como más adelante. El proceso de compactación por tráfico reducirá el contenido de vacíos de aire de la mezcla y, a su vez, exprimirá parte del ligante asfáltico fuera de la mezcla. El “asfalto extra” aparecerá como una franja longitudinal o una mancha rica (fat spot) a lo largo de la trayectoria de cada carril.
Otra posible causa de sangrado es la condición de la capa de pavimento sobre la cual se coloca la nueva mezcla. Si la capa subyacente tiene exceso de asfalto en su superficie o exceso de material de sellado de grietas en las grietas y juntas, parte de este material puede ser arrastrado hacia arriba a través de una capa delgada de mezcla nueva. Además, si se aplica demasiado riego de liga (tack coat) a la capa de pavimento original, el material en exceso puede subir a través de una sobrecarpeta delgada y contribuir al problema de sangrado.

12.11.3 Soluciones

Las variaciones en la temperatura de la mezcla asfáltica detrás de la terminadora (paver) indican que el contenido de humedad de la mezcla también puede ser variable. Cuando la humedad se ha evaporado, la temperatura es más baja. Este último fenómeno puede contribuir tanto al sangrado (bleeding) de la mezcla posteriormente bajo el tráfico, como a la generación de manchas ricas (fat spots) en la mezcla durante la construcción.

Por lo tanto, el agregado utilizado en la mezcla debe estar relativamente seco y el contenido de humedad de la mezcla al momento de salir de la planta de asfalto debe ser lo más bajo posible, pero no mayor al 0,5 %. Se debe tener especial cuidado en el secado cuando se producen mezclas que incorporan agregados altamente absorbentes.
Los problemas de sangrado (bleeding) causados por un exceso de ligante asfáltico en la mezcla pueden resolverse más fácilmente reduciendo el contenido de ligante, de manera coherente con otras propiedades de la mezcla, como los vacíos de aire, el VMA y la resistencia o estabilidad. Los problemas de sangrado que ocurren en conjunto con el ahuellamiento del pavimento generalmente solo pueden resolverse mediante un rediseño completo de la mezcla, con énfasis en un contenido adecuado de vacíos de aire y en los criterios de VMA.

12.11.4 Efectos en el desempeño

Las manchas ricas ocasionales (fat spots) en la mezcla no deberían afectar la durabilidad final del pavimento de manera significativa. Sin embargo, la presencia de muchas manchas ricas, o cantidades significativas de sangrado (bleeding) en las huellas de las ruedas, sí afecta el desempeño del pavimento, debido al contenido variable de ligante y al contenido de vacíos de aire en diferentes partes de la mezcla. Además, pueden ocurrir otros problemas en la mezcla, como:empuje (shoving), ahuellamiento (rutting), pérdida de resistencia al deslizamiento, especialmente en una mezcla que contiene muchas manchas ricas o áreas de sangrado en las huellas de las ruedas. El diseño de la mezcla, la operación de la planta de asfalto (que asegure una eliminación más completa de la humedad), o ambos, deben revisarse para garantizar que la mezcla producida proporcione un desempeño adecuado del pavimento bajo carga vehicular.

12.12 MARCAS DE RODILLO

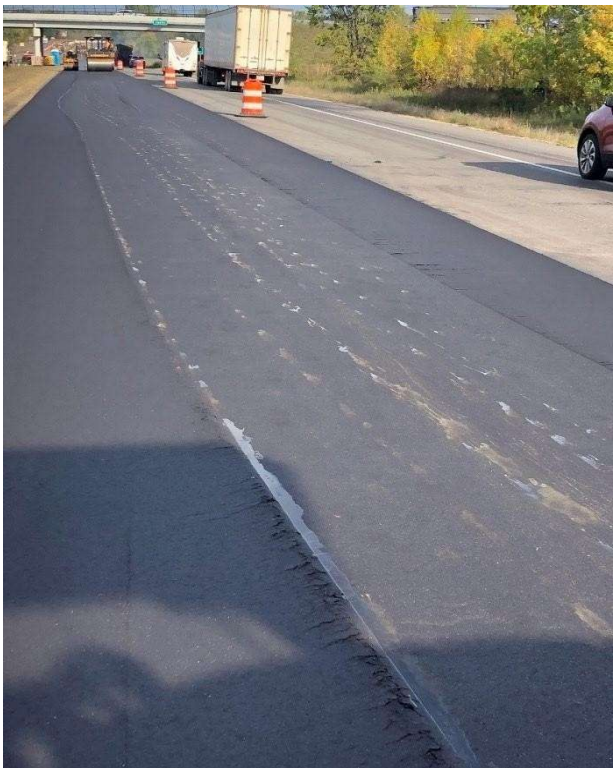
12.12.1 Descripción

Ver vídeo:
Operaciones de rodillos

Durante el proceso de compactación —ya sea que se utilicen rodillos vibratorios, rodillos de acero estáticos o rodillos neumáticos— se producen pliegues longitudinales o marcas en la superficie de la mezcla. Una vez que la mezcla se ha enfriado hasta un rango de temperatura de 160 °F a 140 °F (70 °C a 60 °C), estas marcas normalmente son eliminadas por el rodillo de acabado (finish roller). Las marcas de rodillo son indentaciones que permanecen en la superficie de la mezcla después de que el rodillado ha sido completado (ver Figura 174). En algunas mezclas, los rodillos neumáticos pueden dejar sombras visibles sobre la superficie de la mezcla, incluso después de haber completado el rodillado (ver Figura 175).
Las marcas de rodillo también pueden aparecer en la superficie del pavimento cuando un rodillo se detiene sobre la mezcla caliente durante un periodo de tiempo prolongado, o cuando un rodillo vibratorio opera en un solo lugar.Particularmente cuando se utiliza en la posición de compactación inicial (breakdown), los rodillos neumáticos pueden dejar marcas longitudinales visibles incluso después del rodillado final. Las marcas vibratorias tipo ondulación pueden ser visibles si el rodillo se opera con una amplitud vibratoria incorrecta, un ajuste inadecuado de frecuencia, o una velocidad inapropiada, como se muestra en la Figura 176.

12.12.2 Causas

Las marcas de rodillo pueden ser un indicio de que no se ha realizado el número adecuado de pasadas del rodillo sobre la mezcla (ver Capítulo 8).



Fuente: Centro Nacional de Tecnología del Asfalto

Figura 174. Marcas de rodillo en un pavimento asfáltico recién colocado

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 175. Sombras de rodillo neumático en un pavimento asfáltico nuevo

Fuente: Instituto del asfalto

Figura 176. Marcas tipo "washboard" dejadas por un rodillo vibratorio mal operado

Si el proceso de compactación se detiene antes de que se haya completado la cantidad requerida de pasadas, o si la mezcla se enfría antes de que finalice la compactación, las marcas longitudinales o pliegues producidos por el proceso de rodillado permanecerán en la superficie de la mezcla.

Las marcas de rodillo dejadas en una capa asfáltica también pueden indicar una mezcla blanda o inestable (tender mix) (ver Sección 8.6.2). En esta condición, el operador del rodillo normalmente no podrá eliminar todas las marcas con el equipo de compactación. Una mezcla blanda generalmente no soporta el peso del rodillo de acabado hasta que se haya enfriado lo suficiente como para que la viscosidad del ligante asfáltico aumente y la mezcla se rigidice. Para cuando la mezcla ha disminuido su temperatura a ese punto, el nivel requerido de densidad ya no suele poder lograrse porque la mezcla ha perdido trabajabilidad. Por esta razón, las marcas de rodillo o indentaciones dejadas durante las pasadas de compactación inicial e intermedia generalmente no pueden ser eliminadas durante la compactación final. Todas las propiedades del ligante asfáltico, del agregado y de la mezcla que contribuyen a formar una mezcla blanda, como se mencionó antes, también contribuyen a la incapacidad del rodillo de acabado para eliminar las marcas.

12.12.3 Soluciones

Si la causa de las marcas de rodillo es compactación inadecuada, se deben realizar pasadas adicionales con los rodillos de compactación inicial, intermedia o de acabado para densificar adecuadamente la mezcla. Las soluciones para problemas relacionados con deficiencias en el diseño de la mezcla incluyen cambios en el propio diseño y en la producción de la mezcla en la planta de asfalto. Las propiedades del ligante asfáltico, su cantidad, las características del agregado y la temperatura de la mezcla pueden contribuir a un papel importante en la

trabajabilidad y estabilidad del material asfáltico bajo el equipo de compactación. Las marcas de rodillo normalmente no pueden eliminarse de una mezcla blanda (tender mix) hasta que la temperatura de la mezcla haya disminuido a un nivel relativamente bajo —generalmente menos de 160 °F (70 °C).

La calidad y el contenido del ligante asfáltico, las propiedades y características del agregado, y la temperatura de la mezcla desempeñan un papel significativo en la trabajabilidad y la estabilidad del material asfáltico bajo el equipo de compactación.

A veces es posible, dependiendo de las condiciones ambientales y de las propiedades de la mezcla, eliminar las marcas de rodillo dejadas en la mezcla utilizando un rodillo neumático. Si la superficie de la mezcla está lo suficientemente caliente (140 °F [60 °C] o más), se pueden realizar varias pasadas con un rodillo neumático para “alisar” la superficie del pavimento.
Finalmente, la rugosidad o las marcas tipo ondulación causadas por la operación incorrecta de un rodillo vibratorio deben eliminarse usando técnicas de operación adecuadas con este equipo.

12.12.4 Efectos en el desempeño

Las marcas de rodillo normalmente indican que no se ha logrado el nivel adecuado de compactación. En cuanto a la durabilidad final del pavimento, el contenido de vacíos de aire o la densidad de la mezcla es la característica más importante que gobierna el desempeño de la mezcla asfáltica bajo el tráfico. Si el contenido de vacíos de aire en una mezcla densa es alto, la densidad es baja, y el pavimento generalmente no tendrá buen desempeño bajo tráfico. Las sombras dejadas por rodillos neumáticos no tienen un efecto negativo en el desempeño y normalmente desaparecen poco después de que el pavimento es abierto al tráfico.

12.13 COMPACTACIÓN DEFICIENTE DE LA MEZCLA

12.13.1 Descripción

Las mezclas de gradación densa deben compactarse de manera que los vacíos de aire en sitio se encuentren en un nivel aceptable. El NMAS de las mezclas asfálticas de gradación densa tiene un efecto significativo en la permeabilidad en sitio de la carpeta (ver Sección 3.5.3). A medida que el NMAS de la mezcla disminuye, la impermeabilidad aumenta. Si la mezcla no se compacta adecuadamente, será permeable al aire y al agua y no tendrá la durabilidad requerida. Si la compactación inicial resulta en vacíos de aire de aproximadamente 4 % o menos, la mezcla puede volverse inestable bajo el tráfico después de densificación adicional; el resultado será shoving (empuje) y rutting (ahuellamiento), como se discutió anteriormente. Sin embargo, el uso de ligantes modificados con polímeros en estas mezclas, junto con agregados altamente angulares y de buena calidad, ayuda a mitigar este potencial de abultamiento y ahuellamiento. Algunas mezclas especiales que utilizan ligantes altamente modificados están diseñadas para tener entre 2 % y 3 % de vacíos de aire en sitio. La mayoría de las mezclas requieren un nivel significativo de compactación para alcanzar el nivel deseado de vacíos de aire.

12.13.2 Causas

Cuando la mezcla está demasiado rígida o blanda, la compactación se vuelve difícil. La causa principal de una mala compactación es una baja densidad de diseño de la mezcla (altos vacíos de aire de diseño), lo que resulta efectivamente en una mezcla con bajo contenido de ligante según el diseño (ver Capítulo 3). Otras causas incluyen: Soporte inadecuado de la capa subyacente (ver Capítulo 5). Uso inadecuado del tipo o peso de los rodillos. Presión incorrecta en rodillos neumáticos. Procedimientos de rodillado incorrectos (Capítulo 8). Diseño inadecuado de la mezcla (Capítulo 3). Segregación de la mezcla (Capítulo 10). Humedad en la mezcla (Capítulo 3).
Variación en la temperatura de la mezcla. Temperatura de mezcla demasiado baja.

12.13.3 Soluciones

Las soluciones a los problemas de compactación incluyen tomar los pasos necesarios para asegurar un soporte adecuado, producir una mezcla aceptable, y utilizar técnicas satisfactorias de extendido y rodillado. Cuando el soporte es inadecuado, puede ser necesario relajar los requisitos de compactación o rediseñar la mezcla para permitir una compactación aceptable.

Cuando el contenido de asfalto es demasiado alto, la mezcla puede compactarse demasiado fácilmente, resultando en bajos vacíos de aire, lo que puede llevar a ahuellamiento (ahuellamiento). Cuando el contenido de asfalto es demasiado bajo, la mezcla puede ser rígida y difícil de compactar a la densidad especificada.

Las buenas técnicas de extendido y rodillado, como se discutió anteriormente en este manual, son necesarias para lograr una buena compactación. La densidad normalmente puede incrementarse reduciendo la velocidad de la pavimentadora o de los rodillos. La densidad también puede aumentarse incrementando el peso y el número de rodillos. El proceso de compactación debe ajustarse para producir la densidad óptima.

12.13.4 Efectos en el desempeño

Cuando la compactación es inadecuada, la mezcla será permeable al aire y al agua. El agua puede fluir a través de la mezcla asfáltica y reducir la resistencia de la base subyacente. Los altos vacíos de aire también provocan excesiva oxidación de la mezcla asfáltica, lo que conduce a: desgranamiento (raveling), agrietamiento, y deterioro general del pavimento asfáltico con el tiempo. Se ha encontrado que un aumento del 1 % en la densidad puede incrementar de manera conservadora la vida útil del pavimento en un 10%.

Cuando los vacíos de aire son excesivamente bajos después de la compactación (menos del 4 % para mezclas densas), la mezcla tiene mayor probabilidad de ahuellarse (rut) y empujarse (shove) bajo el tráfico. Nuevamente, el uso de ligantes modificados con polímeros en estas mezclas, combinado con agregados angulares de alta calidad, ayuda a reducir este potencial de abultamiento y ahuellamiento. Los vacíos de aire bajos no son el resultado de demasiada compactación, sino de una mezcla insatisfactoria.

12.14 COMPACTACIÓN DEFICIENTE DE LA MEZCLA

La discusión anterior se ha centrado únicamente en aquellos problemas que ocurren durante la producción de la mezcla asfáltica, la extensión y la compactación. Sin embargo, una vez finalizada la construcción, pueden aparecer varias otras deficiencias en la estructura del pavimento asfáltico debido al tiempo y a las cargas del tráfico. Entre esas fallas se incluyen el agrietamiento por fatiga, la deformación (rutting), el desplazamiento (shoving), el ravelling y la desintegración. El análisis de estos tipos de deterioro está fuera del alcance de este Manual.

Apéndice

VIDEOS DE ASFALTO DE AEROPUERTO DE AAPTP

Para complementar la guía escrita en este Manual, la AAPTP produjo una serie de 30 videos que destacan los temas clave abordados en los capítulos. Filmados en proyectos activos de aeródromos en todo Estados Unidos, estos videos de 3 a 5 minutos demuestran las mejores prácticas en campo y presentan las perspectivas de profesionales de la industria. Un ícono de video dentro del Manual indica cuando hay un video relacionado disponible. A continuación, se presenta una lista completa de los videos, con enlaces directos, organizada por capítulo.

Organización del proyecto

Comunicación en proyectos de aeródromos

Reportes, tiquetes y seguimiento

Seguridad en proyectos de asfalto

Materiales asfálticos y diseño de mezclas

Materiales en una fórmula Job-Mix

Diseño de mezcla balanceada para mezclas de aeródromos

Producción en planta

Producción en una planta de tambor

Seguridad en proyectos de asfalto

Preparación de la superficie

Riegos de imprimación y liga

Fresado y limpieza

Requerimientos de regularidad en aeródromos

Entrega de mezcla

Cálculo de rendimiento

Carga desde la planta al camión

Carga del camión al MTV y la pavimentadora

Reportes, tiquetes y seguimiento

Colocación de mezcla

Operaciones de la pavimentadora

Controles de la regla

Cálculo de rendimiento

Compactación

Tipos de rodillos

Factores que afectan la compactación

Espesor mínimo

Operaciones con rodillos

Construcción de juntas

Construcción de juntas transversales

Construcción de juntas longitudinales

Pavimentación en tándem

Segregación

Segregación en la planta de asfalto

Segregación en el sitio de obra

Aseguramiento de la calidad

Informe completo del lote

Ensayos comunes de QA/QC en laboratorio

Porcentaje dentro de los límites (PWL)

Procedimientos de muestreo

Extracción de núcleos

Franjas de control para trabajos FAA

Interpretación de la regularidad

Espesor mínimo

Problemas de carpeta asfáltica

Construcción de juntas longitudinales

Construcción de juntas transversales

Operaciones con rodillos